

С. С. УРАЛОВ

КУРС
ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ
АСТРОНОМИИ



Уралов С. С. Курс геодезической астрономии: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1980. 592 с.

В книге детально рассмотрена общая теория методов геодезической астрономии. Описаны различные способы астрономических определений географических координат и азимута. Приведены универсальные алгоритмы и стандартные схемы вычислений для всей совокупности способов, основанных на измерении зенитных расстояний и азимутов светил. Дано краткое описание астрономических, угломерных приборов и их исследований.

Книга предназначена для студентов геодезических вузов, преподавателей, аспирантов и инженерно-технических работников.

Табл. 134, ил. 97, список лит. — 88 назв.

Рецензенты: профессор, доктор технических наук **М. М. Машимов**, кандидат технических наук **А. М. Старостин**

Настоящий учебник предназначен для студентов астрономо-геодезической специальности геодезических вузов и составлен в соответствии с программой курса «Геодезическая астрономия», утвержденной Учебно-методическим управлением по высшему образованию в октябре 1976 г. Он может быть также рекомендован студентам других геодезических специальностей, аспирантам и инженерам-геодезистам, которым в процессе своей деятельности приходится заниматься вопросами геодезической астрономии.

В данном курсе, в отличие от ранее изданных учебников и учебных пособий, излагается общая теория методов геодезической астрономии. Различные способы астрономических определений географических координат, составляющих отклонения отвесной линии, геодезического и астрономического азимута, а также дирекционного угла направления на земной предмет излагаются на основе общей теории как отдельные частные случаи.

Изложение теории способов геодезической астрономии дедуктивным методом, от общего к частному, имеет существенные преимущества перед принятыми в настоящее время частными теориями различных способов как в научно-методическом, так и в практическом отношениях.

Дедуктивный метод наряду со сжатостью и логической последовательностью изложения способствует более глубокому усвоению студентами сущности изучаемого материала. Общая теория позволяет решать с единых позиций весь комплекс задач, связанных с созданием любых целесообразных способов астрономических определений, установлением выгоднейших условий наблюдений, обоснованием рациональной методики вычислений и оценки точности.

На основе общей теории установлена классификация способов астрономических определений, имеющая важное методическое значение для правильной постановки курса астрономии и его изучения. Большим достоинством курса, построенного на общей теории, является общность и строгость решения задач геодезической астрономии, а также возможность осуществления максимальной автоматизации процесса вычислений на основе применения ЭВМ.

В учебнике рассматривается значительно больше способов, чем в ранее изданных учебных пособиях. Преобладающая часть способов иллюстрируется примерами с подробным изложением методики наблюдений и вычислений. При этом обработка наблюдений произведена по единым формулам и стандартным схемам для всех способов, основанных на измерении зенитных расстояний или азимутов светил. Такая методика обработки позволяет суще-

ственно упростить и стандартизировать вычисления не только с помощью обычных вычислительных средств, но и при применении электронных вычислительных машин. На основе общей теории оказалось возможным создать универсальные алгоритмы и единые программы вычислений как для зенитальных, так и для азимутальных способов.

Астрономические угломерные приборы в учебнике описаны предельно кратко, так как с ними студенты подробно знакомятся в курсе геодезии.

По той же причине в учебнике изложены только те исследования астрономического теодолита, которые характерны для астрономии и не излагаются в геодезии.

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность кандидату технических наук А. И. Константинову, коллективу кафедры астрономии и космической геодезии МИИГАиК, а также профессору, доктору технических наук М. М. Машимову и кандидату технических наук А. М. Старостину за советы и замечания, способствовавшие улучшению учебника.

Автор будет также признателен всем читателям, которые сообщат свои замечания и отзывы.

§ 1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

Геодезической астрономией называется раздел астрономии, в котором изучают способы определения географических координат точек земной поверхности и азимутов направлений из наблюдений светил.

В предмет геодезической астрономии входит также изучение соответствующих приборов, с помощью которых производят астрономические определения для указанных целей.

Термин «Геодезическая астрономия» указывает на большое значение этого раздела астрономии для решения научных и практических задач геодезии.

Астрономические определения широт, долгот и азимутов совместно с результатами геодезических и гравиметрических измерений обеспечивают установление исходных геодезических дат и ориентировку государственной геодезической сети, определение параметров земного эллипсоида, ориентирование осей референцной системы геодезических координат и определение высот квази-геоида относительно референц-эллипсоида.

Геодезические азимуты сторон триангуляции, полученные из астрономических наблюдений, называемые азимутами Лапласа, служат для ориентирования триангуляции и отдельных ее звеньев в единой системе геодезических координат. В то же время они являются средством действенного контроля угловых измерений в астрономо-геодезической сети. Азимуты Лапласа ограничивают, локализуют действие систематических и случайных погрешностей в угловых измерениях, тем самым значительно ослабляя их влияние в обширных геодезических сетях. Поэтому азимуты Лапласа по праву можно назвать угловыми базами геодезической сети.

Таким образом, астрономические определения высокой точности, выполняемые в государственной триангуляции, составляют неразрывное целое с геодезическими работами. Они являются непременной частью современной геодезической сети, отвечающей различным научным и практическим задачам.

Пункты геодезической сети, на которых произведены определения астрономических широт, долгот и азимутов, называют пунктами Лапласа. Согласно «Инструкции о построении государственной геодезической сети Союза ССР», пункты Лапласа определяются:

на обоих концах базисных сторон триангуляции 1 класса в вершинах полигонов (на обоих концах крайних сторон звеньев полигонометрии);

на промежуточных пунктах рядов триангуляции (полигонометрии) 1 класса через 70—110 км;

в сплошных сетях 1 и 2 класса — на обоих концах базисной стороны триангуляции (стороны полигонометрии) в середине полигона. Таким образом, в каждом отдельно взятом полигоне 1 класса определяют минимум 18—20 пунктов Лапласа.

Кроме того, астрономические определения широт и долгот производятся на пунктах государственной геодезической сети 1 и 2 классов, расположенных на основных линиях астрономо-гравиметрического нивелирования. Распределение астрономических пунктов на этих линиях зависит от плотности гравиметрической съемки и рельефа местности. Так, например, при плотности детальной гравиметрической съемки один пункт на 200 км² астрономические определения на линиях астрономо-гравиметрического нивелирования производятся на двух смежных пунктах не реже чем через 125 км. При прохождении линий астрономо-гравиметрического нивелирования по районам, не покрытым детальными гравиметрическими съемками, астрономические пункты располагаются в среднем через 60 км.

Астрономические определения на пунктах Лапласа в геодезических сетях 1 и 2 класса, а также на пунктах основных линий астрономо-гравиметрического нивелирования выполняются с одинаковой точностью. Точность, получаемая по внутренней сходимости результатов наблюдений на пункте, характеризуется средними квадратическими погрешностями определения:

широты — не более 0,3"

долготы — не более 0,03^s

астрономического азимута — не более 0,5".

В недавнем прошлом астрономические определения имели большое значение при производстве топографических съемок в малообжитых, удаленных районах, в которых геодезическая сеть еще отсутствовала. В этих районах астрономические пункты с учетом данных гравиметрических определений, использовались как опорные для съемок масштаба 1 : 100 000 и мельче.

В настоящее время, в связи с возрастанием объема крупномасштабных съемок, резко увеличился объем восстановления пунктов государственной геодезической сети.

Одним из важных элементов этих работ является определение дирекционных углов направлений на ориентирные пункты. При утрате наружных геодезических знаков наиболее целесообразным и экономичным является автономный метод определения дирекционных углов из астрономических определений.

Методы геодезической астрономии успешно применяются в космических исследованиях: при построении базисов космической триангуляции, при определениях астрономических координат пунктов космической триангуляции. Принципиально эти методы можно применить для определения координат искусственных спутников Земли и других космических аппаратов.

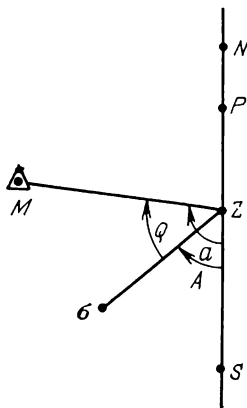


РИС. 2

В соответствии с изложенным все способы астрономических определений широты, времени и направления меридиана строятся на двух основных принципах измерения:

1) зенитных расстояний светил, способы, основанные на этом принципе, называются зенитальными;

2) азимутов светил (точнее, горизонтальных направлений на светила), способы этой группы называются азимутальными.

Принципиально положение зенита на небесной сфере может быть определено еще и третьим методом, а именно — путем одновременного измерения зенитного расстояния и азимута какого-либо светила.

Отсюда могла бы быть и третья группа способов астрономических определений — зенитально-азимутальная (комбинированная).

Однако в общем случае практическое осуществление одновременных наблюдений зенитного расстояния и азимута светила, перемещающегося в поле зрения трубы, дело весьма трудное. Поэтому для точных определений широты, времени и направления меридиана способы третьей группы, как правило, не применяются.

Как известно, географическая долгота пункта относительно начального меридиана численно равна разности одноименных местных времен¹, определенных одновременно (или приведенных к одному и тому же моменту) как в пункте наблюдения, так и в пункте, расположенном на начальном меридиане, т. е.

$$\lambda = s - S = m - UT1.$$

Поэтому задача определения долготы пункта состоит из:

определения местного времени s или m в некоторый момент T по измерениям зенитных расстояний светил или их азимутов; определения времени начального меридиана S или $UT1$ в тот же самый момент T , например из приема радиосигналов времени.

Задача определения азимута a направления на земной предмет (рис. 2) сводится обычно к определению азимута светила A и измерению горизонтального угла Q между светилом и местным предметом. В этом случае азимут направления на земной предмет определяется формулой

$$a = A + Q.$$

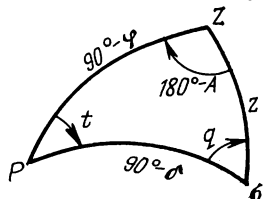


РИС. 3

Аналитическое обоснование различных способов определения широты, времени и азимута вытекает из решения параллактического треугольника $PZ\sigma$ (рис. 3), построенного для каждого наблюдаемого светила.

¹ О шкалах времени см. в главе 2.

Рассмотрим вначале в самых общих чертах обоснование некоторых зенитальных способов астрономических определений, а затем азимутальных.

§ 3. ПОНЯТИЕ О ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБАХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В этой группе способов основным уравнением, вытекающим из параллактического треугольника $PZ\sigma$ и связывающим измеряемую величину z в некоторый момент T по хронометру с определяемыми значениями широты φ и времени s (поправки хронометра u), является известное уравнение связи

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (1)$$

где $t = s - \alpha = T + u - \alpha$.

Полагая, что z и T известны из измерений, а значения экваториальных координат α и δ выбираются из звездного каталога на момент наблюдений, в уравнении (1) будем иметь два неизвестных: φ и u .

Определение этих неизвестных на основании уравнения (1) можно производить как совместно, так и отдельно. При этом в обоих случаях нахождение искомым величин облегчается тем обстоятельством, что их приближенные значения бывают уже наперед известны. Поэтому, как правило, в способах совместного определения приходится находить малые поправки $\Delta\varphi$ и Δu к приближенным значениям неизвестных φ_0 и u_0 , а в способах отдельного определения — определять точно или поправку часов u при известной широте φ , или же, наоборот, широту φ при известной поправке часов u .

Для совместного определения, как указывалось выше, необходимо измерить зенитные расстояния минимум двух светил, расположенных вблизи плоскостей двух произвольных взаимно перпендикулярных вертикалов. Тогда из совместного решения двух уравнений вида (1)

$$\cos z_1 = \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos (T_1 + u - \alpha_1);$$

$$\cos z_2 = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos (T_2 + u - \alpha_2)$$

принципиально можно найти искомые значения широты φ и поправки хронометра u .

В общем случае задача совместного определения широты и времени решается по измеренным зенитным расстояниям n светил, где $n > 2$, для чего уравнения (1), приведенные к линейному виду, решаются по методу наименьших квадратов.

Обоснование тех или иных способов астрономических определений строится на общем принципе, применяемом при любых измерениях, а именно, на принципе максимальной точности определяемых величин.

Условия наблюдений, при которых для данных средств измерений достигается максимальная точность определяемых величин, называются выгоднейшими условиями наблюдений.

При соблюдении выгоднейших условий наблюдений влияние погрешностей измерений, а также исходных данных должно быть минимальным.

Для обоснования выгоднейших условий определения широты, времени и азимута обычно пользуются известными из сферической астрономии дифференциальными формулами изменения зенитного расстояния и азимута светила.

В зенитальных способах для этой цели применяют дифференциальную формулу изменения зенитного расстояния светила, получаемую путем разложения в ряд Тейлора выражения (1), с учетом членов первого порядка

$$\Delta z = 15 \cos \varphi \sin A \Delta t + \cos \Delta \varphi - \cos q \Delta \delta, \quad (2)$$

где $\Delta t = \Delta T + \Delta u - \Delta \alpha$.

Решив выражение (2) относительно $\Delta \varphi$ и Δu , получим соответственно

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta z}{\cos A} - 15 \cos \varphi \operatorname{tg} A (\Delta T + \Delta u - \Delta \alpha) + \frac{\cos q}{\cos A} \Delta \delta, \quad (3)$$

$$\Delta u = -\Delta T + \Delta \alpha + \frac{\Delta z}{15 \cos \varphi \sin A} - \frac{\Delta \varphi}{15 \cos \varphi \operatorname{tg} A} + \frac{\cos q \Delta \delta}{15 \cos \varphi \sin A}. \quad (4)$$

Анализ дифференциальных формул (3) и (4) позволяет сделать следующие выводы.

Выгоднейшими условиями для определения широты по измеренным зенитным расстояниям светил [формула (3)] являются наблюдения их в меридиане.

При этом истинная погрешность определения широты $\Delta \varphi$ не зависит от погрешностей поправки хронометра Δu , оценки момента наблюдения светила ΔT и прямого восхождения $\Delta \alpha$, так как для наблюдений в меридиане коэффициент при указанных погрешностях обращается в нуль ($\operatorname{tg} A = 0$).

Влияние погрешности измерения зенитного расстояния светила Δz при наблюдении в меридиане также будет наименьшим, так как для меридиана $\cos A = 1$. Если для определения широты произвести наблюдение двух звезд в меридиане, одной к югу от зенита ($\cos A = +1$), а другой к северу ($\cos A = -1$), то в среднем выводе широты исключится влияние постоянной составляющей погрешности Δz , не зависящей от зенитного расстояния светила. При наблюдении же двух звезд на близких или равных зенитных расстояниях в меридиане или вблизи от него влияние систематической части Δz исключится полностью.

В соответствии с указанными выгоднейшими условиями и строятся способы определения широты по измеренным зенитным расстояниям пар звезд в меридиане или в непосредственной близости от него.

Выгоднейшими условиями для определения поправки хронометра по измеренным зенитным расстояниям светил [формула (4)] являются наблюдения их в первом вертикале.

При этом погрешность определения поправки хронометра Δu не зависит от погрешности $\Delta \varphi$ принятого для вычислений значения широты ($\operatorname{tg} A = \infty$), а влияние погрешностей Δz и $\Delta \delta$ будет наименьшим ($\sin A = 1$).

Для исключения постоянной составляющей погрешности Δz определение времени целесообразно производить по наблюдениям двух звезд в первом вертикале, на равных или близких зенитных расстояниях, одной к западу ($\sin A = +1$), другой к востоку ($\sin A = -1$) от зенита. Среднее значение поправки хронометра, выведенное из наблюдений такой пары звезд, будет свободно от влияния постоянной составляющей погрешности Δz . Заметим, что погрешность оценки момента ΔT наблюдения светила и его прямого восхождения $\Delta \alpha$ целиком входит в погрешность определения времени, а следовательно, и долготы пункта. При этом особую опасность представляет систематическая часть δT погрешности ΔT , называемая лично-инструментальной погрешностью, или лично-инструментальным уравнением.

При определениях долгот пунктов нужно принимать все меры для точного определения величины этой систематической погрешности и исключения ее влияния из результатов определения долготы пункта.

Необходимо также отметить, что влияние случайных погрешностей измерения зенитных расстояний светил на точность определения времени или долготы возрастает с увеличением широты пункта наблюдения пропорционально $\sec \varphi$.

Приведем некоторые примеры зенитальных способов определения широты и времени.

Наиболее полное исключение погрешностей измерения зенитных расстояний в результатах определения широты или поправки хронометра получается при наблюдении двух (или нескольких) звезд на равных зенитных расстояниях. Для двух звезд, наблюдаемых на равных зенитных расстояниях ($z_1 = z_2 = z$), можем написать уравнения вида (1):

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos (T_1 + u - \alpha_1);$$

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos (T_2 + u - \alpha_2).$$

Поскольку левые части этих выражений равны, следовательно, равны и правые, т. е.

$$\begin{aligned} \sin \varphi \sin \delta_1 + \cos \varphi \cos \delta_1 \cos (T_1 + u - \alpha_1) &= \\ &= \sin \varphi \sin \delta_2 + \cos \varphi \cos \delta_2 \cos (T_2 + u - \alpha_2). \end{aligned} \quad (5)$$

В равенстве (5) имеется два неизвестных: φ и u . При условии, например, что u известно, из выражения (5) по наблюдениям двух звезд на равной высоте можно определить широту φ по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\cos \delta_2 \cos (T_2 + u - \alpha_2) - \cos \delta_1 \cos (T_1 + u - \alpha_1)}{\sin \delta_1 - \sin \delta_2}. \quad (6)$$

Из выгоднейших условий определения широты следует, что звезды в паре необходимо выбирать вблизи меридиана, на севере и на юге.

Подобным образом из выражения (5) можно определить u , при условии что известно φ .

Для этого, в соответствии с выгоднейшими условиями определения u , необходимо произвести наблюдения пары звезд на равных высотах в первом вертикале или вблизи от него, причем одна звезда пары выбирается на западе, а другая на востоке.

Из выражения (5) видно, что для определения широты или времени по наблюдениям двух звезд на равной высоте необходимо заметить по хронометру только моменты T_1 и T_2 прохождения звезд через горизонтальную нить зрительной трубы, установленной на зенитное расстояние z данной пары¹. Производить же отсчеты по вертикальному кругу не нужно.

Следовательно, в данных способах определения широты и времени полностью исключаются погрешности, связанные с отсчетами по вертикальному кругу (систематические и случайные погрешности диаметров круга, отсчетных приспособлений, непосредственные погрешности отсчетов по кругу и т. д.).

Таким образом, наряду с максимальным ослаблением систематических погрешностей в разобранных способах определения широты и времени значительно ослаблено также и влияние случайных погрешностей наблюдений. Поэтому оба эти способа рекомендуются инструкцией для точных определений широты и времени в астрономо-геодезической сети. Первый из них называется способом Певцова, второй способом Цингера, по имени двух русских военных геодезистов, разработавших их в восьмидесятых годах прошлого столетия.

На этом же принципе основывается способ совместного определения широты и времени по наблюдениям n звезд на равных высотах ($n \geq 3$). Значения φ и u (λ) здесь находят из уравнивания путем совместного решения n уравнений (1), приведенных к линейному виду, по методу наименьших квадратов. Этот способ называется способом равных высот. Идея этого способа принадлежит немецкому ученому Гауссу. При наблюдениях астрономическим теодолитом способ равных высот известен как способ Мазаева, по имени советского военного геодезиста, раз-

¹ Кроме отсчетов по хронометру T_1 и T_2 , соответствующих моментам прохождения двух звезд через одну и ту же нить, для приведения наблюдений к одной высоте производятся отсчеты по уровню, скрепленному с трубой.

работавшего методику наблюдений серии звезд на равной высоте с помощью астрономического теодолита.

Для определения широты по наблюдениям звезд в самом меридиане их очень трудно подобрать точно на равных зенитных расстояниях.

Кроме того, в меридиане нельзя производить наблюдение прохождений звезд через горизонтальные нити неподвижной по высоте трубы, так как звезды в меридиане перемещаются параллельно горизонтальным нитям. В этом случае для определения широты наблюдают пары звезд в меридиане с малой разностью зенитных расстояний, одну на Севере, другую на Юге от зенита.

Имея в виду, что в меридиане $\cos t = 1$, для южной звезды из формулы (1) получим

$$\cos z_S = \sin \varphi \sin \delta_S + \cos \varphi \cos \delta_S = \cos (\varphi - \delta_S),$$

откуда

$$\varphi_1 = z_S + \delta_S.$$

Для северной звезды в верхней кульминации на том же основании будем иметь

$$\varphi_2 = \delta_N - z_N.$$

Среднее значение широты по наблюдениям северной и южной звезд будет

$$\varphi = \frac{1}{2} (\varphi_1 + \varphi_2) = \frac{1}{2} (\delta_S + \delta_N) + \frac{1}{2} (z_S - z_N). \quad (7)$$

Разность $z_S - z_N$, если она превышает рабочую часть поля зрения трубы, можно определить по измеренным зенитным расстояниям каждой звезды пары. Этот способ был разработан для наблюдений с вертикальным кругом основателем Пулковской обсерватории В. Я. Струве. Для определения широты полевых пунктов с помощью астрономического теодолита этот способ находит широкое применение до настоящего времени.

Если разность $z_S - z_N$ не превышает рабочей части поля зрения трубы ($|z_S - z_N| < 30'$), то ее измеряют при неподвижной установке трубы по высоте с помощью подвижной горизонтальной нити окулярного микрометра без отсчетов по вертикальному кругу.

Этот способ определения широты называется способом Талькотта, по имени американского геодезиста, разработавшего его в середине прошлого столетия. Способ Талькотта также рекомендуется инструкцией для определения широты пунктов 1 и 2 классов как один из основных способов.

§ 4. ПОНЯТИЕ ОБ АЗИМУТАЛЬНЫХ СПОСОБАХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В азимутальных способах основным уравнением, связывающим измеряемую величину A (см. рис. 3) с определенными значениями широты φ и времени s , является

$$\operatorname{ctg} A_N := \sin \varphi \operatorname{ctg} t - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t, \quad (8)$$

где $t = s - \alpha = T + u - \alpha$.

Практически с помощью угломерного прибора измеряются не азимуты светил A , а горизонтальные направления на светила N (рис. 4), так как точное направление меридиана на определяемом пункте, как правило, неизвестно.

В функции измеренного горизонтального направления N азимут светила, отсчитываемый от точки Севера, найдется из следующего выражения

$$A_N = N - M_N, \quad (9)$$

где M_N — место Севера — отсчет горизонтального круга, соответствующий при данном ориентировании круга направлению на Север.

При определении азимута светила по формуле (9) место Севера M_N входит с одним и тем же знаком как для наблюдений при КЛ, так и при КП, и поэтому не может быть исключено методикой наблюдений.

Поэтому при определении азимута по измеренному горизонтальному направлению на светило в уравнении (8), с учетом равенства (9), будет три неизвестных: M_N , φ и u , которые можно найти путем как совместных, так и отдельных определений. Для совместного их определения необходимо произвести наблюдения по крайней мере трех светил минимум в двух различных вертикалах и решить совместно три уравнения связи (8).

В общем случае задача совместного определения решается по измерениям горизонтальных направлений на n светил и соответствующем решении n уравнений (8), приведенных к линейному виду, по методу наименьших квадратов.

В способах отдельного определения M_N , φ и u , пользуясь приближенными или точными значениями одних величин, производят определение других в условиях, при которых погрешности измерений, а также погрешности величин, принятых за известные, не оказывают существенного влияния на результат определений.

Для обоснования выгоднейших условий определения азимута светила, широты и

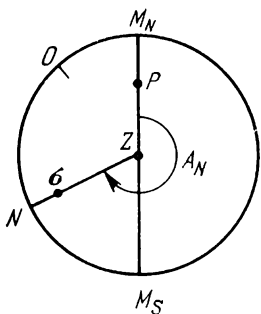


РИС. 4

времени в азимутальных способах обычно применяют дифференциальную формулу изменения азимута светила, имеющую вид

$$\Delta A_N = \frac{15 \cos \delta \cos q}{\sin z} (\Delta T + \Delta u - \Delta \alpha) + \frac{\sin A}{\operatorname{tg} z} \Delta \varphi + \frac{\sin q}{\sin z} \Delta \delta, \quad (10)$$

где в функции погрешностей измеренного горизонтального направления ΔN на светило и места Севера ΔM_N имеем

$$\Delta A_N = \Delta N - \Delta M_N. \quad (11)$$

Решив выражение (10) относительно $\Delta \varphi$ и Δu , получим соответственно

$$\Delta \varphi = \frac{\operatorname{tg} z}{\sin A_N} \Delta A_N - \frac{15 \cos \delta \cos q}{\cos z \sin A_N} (\Delta T + \Delta u - \Delta \alpha) - \frac{\sin q}{\cos z \sin A_N} \Delta \delta, \quad (12)$$

$$\Delta u = -\Delta T + \Delta \alpha + \frac{\sin z}{15 \cos \delta \cos q} \Delta A_N - \frac{\cos z \sin A_N}{15 \cos \delta \cos q} \Delta \varphi - \frac{\sin q}{15 \cos \delta \cos q} \Delta \delta. \quad (13)$$

Для установления выгоднейших условий определения азимута направления на земной предмет по измеренному горизонтальному углу Q между светилом и местным предметом воспользуемся полученной выше формулой $a = A_N + Q$, из которой

$$\Delta a = \Delta A_N + \Delta Q = \Delta A_N + \Delta M - \Delta N, \quad (14)$$

где ΔM — погрешность горизонтального направления на земной предмет.

Подставив в (14) выражение ΔA_N из формулы (10), получим

$$\Delta a = \frac{15 \cos \delta \cos q}{\sin z} (\Delta T + \Delta u - \Delta \alpha) + \frac{\sin A_N}{\operatorname{tg} z} \Delta \varphi + \frac{\sin q}{\sin z} \Delta \delta + \Delta M - \Delta N. \quad (15)$$

Из формулы (15) следует, что при данных значениях погрешностей $\Delta \alpha$, $\Delta \delta$, ΔT , Δu , $\Delta \varphi$ погрешность азимута Δa будет тем меньше, чем больше склонение светила и чем ближе оно к меридиану.

В северном полушарии этим условиям наилучшим образом удовлетворяет Полярная звезда, склонение которой близко к 90° ($\cos \delta \approx 0$), а азимут для широт до 65° не превышает $\pm 2^\circ 40'$ ($\sin A \approx 0$). На этом основании инструкция рекомендует производить определение точного астрономического азимута способом измерения горизонтального угла между Полярной и местным предметом.

В дальнейшем будет показано, что погрешность ΔN измерения горизонтального направления на Полярную имеет систематический характер и ее влияние возрастает с уменьшением зенитного расстояния светила пропорционально $\operatorname{ctg} z$. Влияние случайных погрешностей измерения горизонтального направления с уменьшением зенитного расстояния наблюдаемого объекта возрастает пропорционально $\operatorname{cosec} z$. Приняв для оценки влияния указанных погрешностей зенитное расстояние Полярной $z_p \approx 90^\circ - \varphi$, видим, что с увеличением широты влияние систематических и случайных погрешностей измерения горизонтального направления на Полярную возрастает, соответственно, пропорционально $\operatorname{tg} \varphi$ и $\operatorname{sec} \varphi$. Поэтому в высоких широтах, где зенитное расстояние Полярной мало, наиболее точные результаты могут дать способы, основанные на наблюдениях светил вблизи горизонта. Из формулы (15) видно, что влияние погрешностей ΔT , Δu , $\Delta \varphi$, $\Delta \alpha$, $\Delta \delta$ также будет небольшим.

Примерами таких способов являются способы определения азимута из наблюдений звезд в меридиане, в вертикале местного предмета, в разных вертикалах и другие способы, с теорией которых мы познакомимся ниже.

Из формулы (12) следует, что для определения широты по измененным горизонтальным направлениям на светила последние необходимо наблюдать в первом вертикале ($\sin A = 1$) и вблизи зенита. При этом влияние всех погрешностей будет наименьшим. Для исключения влияния погрешностей Δu и ΔM_N , а также систематических составляющих погрешностей ΔN и ΔT целесообразно наблюдать пары звезд в первом вертикале на равных зенитных расстояниях по обе стороны от зенита. Так как знаки $\sin A$ для западной и восточной звезд будут противоположны, то влияние указанных систематических погрешностей исключится.

Из формулы (13) вытекают выгоднейшие условия для определения поправки хронометра в азимутальной группе способов. Для этой цели необходимо производить наблюдения светил в меридиане на малых зенитных расстояниях по обе стороны от зенита. При таком выборе светил погрешность Δu не зависит от погрешностей $\Delta \varphi$ и $\Delta \delta$, влияние систематической составляющей погрешности ΔN и погрешности ΔM_N исключается при наблюдении южных и северных звезд в верхней кульминации, влияние случайных погрешностей измерений будет малым. Что касается влияния ΔT и $\Delta \alpha$, то оно для азимутальных способов определения времени и долготы будет таким же, как и для зенитальных способов.

Для максимального ослабления влияния случайных и систематических погрешностей измерений в азимутальной группе можно применить способы, в которых аналогично способам равных высот зенитальной группы не производятся отсчеты по горизонтальному кругу и, следовательно, из результатов наблюдений

исключаются все погрешности, связанные с отсчетами по кругу.

Примерами таких способов являются по аналогии со способами равных высот способы равных азимутов, в которых наблюдения звезд для вывода азимута направления на местный предмет, широты или поправки хронометра производятся в одной вертикальной плоскости.

На этом принципе основан способ определения азимута из наблюдений звезд в вертикале местного предмета. В этом способе азимут направления на местный предмет равен азимуту светила в момент T прохождения светила через большой круг прибора, совмещенный с вертикалом предмета, т. е.

$$a = A_N, \quad (16)$$

где A_N вычисляется по формуле (8) с известными значениями φ и u .

П р и м е ч а н и е. Формулы (16), (17) и (18) приведены без учета инструментальных поправок.

В соответствии с выгоднейшими условиями определения азимута, звезды наблюдаются на больших зенитных расстояниях равным числом по обе стороны от зенита. Для определения азимута указанным способом можно применять прибор, не имеющий горизонтального круга, например пассажный инструмент.

Для определения широты теодолит или пассажный инструмент необходимо установить в первом вертикале или в непосредственной близости от него.

При наблюдении моментов T_E и T_W прохождений двух звезд через вертикал прибора одной к западу, а другой к востоку от зенита ($A_E = A_W \pm 180^\circ$), на малых и близких зенитных расстояниях, на основании формулы (8), получим

$$\begin{aligned} \sin \varphi \operatorname{ctg} (T_E + u - \alpha_E) - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_E \operatorname{cosec} (T_E + \\ + u - \alpha_E) = \sin \varphi \operatorname{ctg} (T_W + u - \alpha_W) - \\ - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_W \operatorname{cosec} (T_W + u - \alpha_W), \end{aligned}$$

откуда

$$\sin \varphi (\operatorname{ctg} t_E - \operatorname{ctg} t_W) = \cos \varphi [\operatorname{tg} \delta_E \operatorname{cosec} t_E - \operatorname{tg} \delta_W \operatorname{cosec} t_W]$$

или

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{\operatorname{tg} \delta_E \operatorname{cosec} t_E - \operatorname{tg} \delta_W \operatorname{cosec} t_W}{\operatorname{ctg} t_E - \operatorname{ctg} t_W} = \\ &= \frac{\operatorname{tg} \delta_E \sin t_W - \operatorname{tg} \delta_W \sin t_E}{\sin (t_W - t_E)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для определения времени пассажный инструмент устанавливается в меридиане. В соответствии с выгоднейшими условиями наблюдаются прохождения звезд через вертикал прибора на малых зенитных расстояниях по обе стороны от зенита.

Так как установить теодолит точно в плоскости меридиана нельзя (да в этом и нет необходимости), то между меридианом и вертикалом теодолита всегда имеется небольшой угол a , называемый азимутом прибора, который в течение ограниченного промежутка времени можно считать постоянным. Очевидно, в этом вертикале с азимутом $a = \text{const}$ и будут наблюдаться прохождения звезд. На основании теоремы синусов для каждой звезды имеем $\sin a \sin z = \sin t \cos \delta$.

Так как вблизи меридиана a и t малы, то, раскладывая синусы этих величин в ряд и ограничиваясь первыми членами разложения, получим

$$t = a \sin z \sec \delta.$$

При

$$t = T + u_0 + \Delta u - \alpha$$

окончательно будем иметь

$$\Delta u \pm a \sin z \sec \delta + (T + u_0 - \alpha) = v, \quad (18)$$

где v — поправка измерения.

В выражении (18) имеем два неизвестных: Δu и a .

Для их совместного определения необходимо произвести наблюдения по крайней мере двух звезд.

Обычно для определения u и a производят наблюдения n звезд, где $n > 2$. В этом случае значения u и a находят из решения n уравнений (18) по методу наименьших квадратов. Это так называемый классический способ определения времени из наблюдений звезд в меридиане с помощью пассажного инструмента.

Данный способ применяется во всех странах для точнейших определений времени в обсерваториях и Службах времени.

Таким образом, на основе выгоднейших условий наблюдений, вытекающих из анализа приведенных выше дифференциальных формул, с учетом наиболее полного исключения или максимального ослабления влияния систематических и случайных погрешностей наблюдений светил и создаются те или иные способы астрономических определений географических координат и азимута направления.

При обосновании способов геодезической астрономии должно соблюдаться правило: наибольшей точности определений достигают не посредством большого числа наблюдений, а посредством малого числа наблюдений, точных во всех их элементах.

§ 5. ПОНЯТИЕ ОБ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СПОСОБОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Дифференциальные формулы (3), (4), (12), (13), (15), связывающие истинные погрешности наблюдаемых и известных величин с истинными погрешностями искомым величин, достаточно наглядно вскрывают механизм действия различных источников погрешностей на приращение какой-либо одной определяемой величины по наблюдениям одного светила. В этом состоит их несомненное достоинство для обоснования и анализа некоторых способов раздельного определения широты, времени и азимута направления.

Однако при априорной оценке результатов совместного определения двух и более величин по наблюдениям n светил применение указанных дифференциальных формул оказывается не только затруднительным, но и невозможным.

Дифференциальные формулы не могут также дать ответа на вопросы, связанные с априорной оценкой точности уравненных значений определяемых величин, с определением весов уравненных значений неизвестных, с установлением выгоднейших условий наблюдений по измеренным зенитным расстояниям или азимутам n светил.

Иными словами, дифференциальные формулы, традиционно применяемые для обоснования способов астрономических определений, являются совершенно недостаточными для изложения целого ряда существенных вопросов теории способов. Кроме того, в имеющейся литературе различные зенитальные и азимутальные способы излагаются обычно в том виде, в каком их излагал тот или иной автор способа, с учетом последующих совершенствований и дополнений в методике наблюдений и обработки. Само изложение различных способов нередко связывается с применением для наблюдений того или иного специализированного астрономического прибора.

При этом для обоснования того или иного способа каждый раз решается отдельная частная задача, вытекающая из той или иной комбинации геометрических соотношений, доставляемых видимым суточным движением небесной сферы.

Такое изложение создает впечатление обособленности различных способов, основанных на одном и том же принципе, нарушает естественные связи между ними, а само создание и обоснование тех или иных способов приобретает значение отдельных независимых друг от друга проблем.

В данном курсе геодезической астрономии сделана попытка изложить общую теорию методов астрономических определений, основанных на одном и том же принципе. Различные способы астрономических определений географических координат и азимута направления излагаются на основе общей теории, и как отдельные частные случаи.

В основу общей теории положена наиболее общая задача способов астрономических определений — задача совместного определения широты, времени (долготы) и азимута направления по измеренным зенитным расстояниям или горизонтальным направлениям на n светил ($n \geq 3$).

При постановке общей задачи не накладываются какие-либо условия на выбор светил по зенитным расстояниям или азимутам, кроме ограничения, обусловленного влиянием больших изменений рефракции и турбулентных потоков воздуха, ухудшающих качество изображения при наблюдениях светил вблизи горизонта.

Для решения общей задачи, пользуясь предварительными (счислимыми) значениями неизвестных, на основании уравнений связи (1) или (8) зенитальных или азимутальных способов составляют соответствующие им уравнения поправок.

На основе анализа средних квадратических погрешностей измерений зенитных расстояний и горизонтальных направлений на светила устанавливаются веса измерений

$$p_z = \frac{c}{m_z^2}; \quad p_N = \frac{c}{m_N^2},$$

численно равные весам соответствующих уравнений поправок.

Решение по методу наименьших квадратов системы из n уравнений поправок, составленных для зенитальных или азимутальных наблюдений, позволяет получить как искомые значения неизвестных, так и оценить точность их вывода.

Анализ выражений весов уравненных значений неизвестных, полученных в результате решения общей задачи, позволяет строго установить выгоднейшие условия наблюдений зенитных расстояний или горизонтальных направлений на светила, при которых эти веса, а следовательно, и точность определяемых величин, будут наибольшими для способов как совместного, так и отдельного их определения.

Выражения весов уравненных значений необходимых неизвестных¹ в зенитальных способах являются функциями числа n и азимутов светил, а в азимутальных способах — дополнительно еще и зенитных расстояний светил.

Для обоснования способов отдельного определения неизвестных ставятся условия максимальной точности или, что равноценно, максимального веса их уравненных значений, т. е.

$$p_x = \max; \quad p_y = \max, \quad p_a = \max.$$

¹ Необходимыми неизвестными в уравнениях поправок зенитальных способов приняты $x = \Delta\varphi$, $y = 15 \cos \varphi_0 \Delta\lambda$ и ζ — постоянная поправка измеряемых зенитных расстояний светил.

В азимутальных способах необходимыми неизвестными являются x , y и ΔM_N (ΔM_N — поправка предварительного значения места Севера).

На основании этих условий из соответствующих выражений весов определяют необходимое для данной определяемой величины распределение светил по азимутам и зенитным расстояниям.

Для способов совместного определения неизвестных при данном числе n наблюдаемых светил нельзя достигнуть максимального веса уравненного значения одновременно для всех определяемых величин. Поэтому при совместном определении неизвестных задаются любым необходимым для решения заданной задачи соотношением весов их уравненных значений, т. е. ставят дополнительное условие вида

$$p_a(\xi) = k_x p_x = k_y p_y,$$

где k_x и k_y — коэффициенты пропорциональности, устанавливаемые для каждой конкретной задачи.

В зависимости от заданных численных значений коэффициентов k_x и k_y из выражений весов уравненных значений неизвестных находят соответствующее этому заданию необходимое распределение светил по азимутам и зенитным расстояниям. При совместных определениях чаще всего полагают

$$k_x = k_y = 1,$$

что означает условие равенства весов уравненных значений неизвестных, иными словами, условие определения искомым величин с одинаковой точностью.

Таким образом, на основе решения общей задачи можно создавать и обосновывать любые целесообразные способы астрономических определений как зенитальной, так и азимутальной групп. При этом различные способы как совместного, так и отдельного определения географических координат и азимута направления вытекают из решения общей задачи в каждой группе способов как отдельные частные случаи.

Пользуясь выражениями весов уравненных значений неизвестных и зная погрешность единицы веса, можно достаточно просто произвести априорно оценку точности определения искомым величин для любого способа. На основе общей теории оказалось возможным произвести классификацию способов астрономических определений по принципу выбора светил по зенитным расстояниям и азимутам, тесно связанному с той или иной характерной методикой наблюдений светил.

Обработка наблюдений, вычисление уравненных значений неизвестных и оценка точности в каждой группе способов производятся по единым для всех способов формулам и стандартным схемам. Такими формулами являются уравнения поправки зенитальной и азимутальной групп.

Для способов, в которых искомая величина находится из ограниченного числа n звезд, например из наблюдений пар звезд

($n = 2$), т. е. при отсутствии избыточных измерений, уравнение поправок превращается в обычное линейное уравнение, в правой части которого вместо поправки измерения v стоит нуль. Решение системы из двух — трех обычных линейных уравнений не представляет труда.

Такая методика обработки позволяет существенно упростить вычисления с помощью не только обычных вычислительных средств, но и электронно-вычислительных машин. На основе общей теории способов астрономических определений оказалось возможным создать единые алгоритмы и единые программы для всех способов как зенитальной, так и азимутальной групп.

РАЗДЕЛ I

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ. ПЕРЕДАЧА И ПРИЕМ РАДИОСИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ

ГЛАВА 1

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Способы определения широты, времени и азимута направления на земной предмет основаны на измерении зенитных расстояний светил или горизонтальных направлений на светила, а также на различных вариациях этих основных методов: на наблюдениях прохождений светил через один и тот же альмукантарат или вертикал, на измерении малой разности зенитных расстояний или горизонтальных углов и т. д.

Многообразие методов астрономических определений, а также специфические особенности каждого из них привели к созданию целого ряда специализированных астрономических приборов, предназначенных для наблюдений теми или иными способами. В настоящее время различают следующие основные виды полевых астрономических приборов:

- астрономический теодолит;
- зенит-телескоп;
- призменная астроябля;
- пассажный инструмент.

Для приближенных астрономических определений применяются различные теодолиты средней и малой точности, а в морской и авиационной астрономии — секстанты. Необходимым прибором для астрономических наблюдений является хронометр или точные часы, по которым фиксируют моменты наблюдения светил.

Специальными исследованиями установлено, что оценка показаний хронометра на слух в моменты визирования на светило сопровождается значительной систематической личной погрешностью наблюдателя, а также большими случайными погрешностями наблюдений¹. Для ослабления их влияния применяются полуавтоматические и автоматические методы наблюдений светил с помощью специальных приборов: контактного микрометра, контактного хронометра, хронографа, механизма для вращения верхней части теодолита по азимуту или трубы по высоте.

¹ Методика наблюдений светил, а также детальный анализ указанных погрешностей наблюдений будут подробно рассмотрены в последующих главах.

В последние годы разработан метод фотоэлектрической регистрации моментов наблюдений звезд, полностью исключаящий личные погрешности наблюдателя. При применении этого метода вместо контактного микрометра для наблюдений звезд используется фотоэлектрическая установка, состоящая из фотоэлектрической насадки на окулярную часть трубы теодолита, усилителя фототока, специального хронографа и блока питания.

В данной главе будут кратко рассмотрены назначение и конструктивные особенности указанных приборов.

Приборы измерения времени будут рассмотрены во второй главе.

§ 6. АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ТЕОДОЛИТЫ

Наибольшее применение в практике геодезической астрономии в настоящее время имеет астрономический теодолит. Он предназначен для точных измерений горизонтальных направлений и зенитных расстояний светил, а также может применяться для наблюдения прохождений светил через один и тот же альмукантарат и через один и тот же вертикал. С помощью окулярного микрометра трубы теодолита можно измерять малые разности зенитных расстояний и малые разности азимутов.

Таким образом, с помощью астрономического теодолита можно производить определения широты, времени и азимута направления всеми известными способами астрономических определений.

Для обеспечения полной «универсальности» горизонтальный и вертикальный круги астрономического теодолита, как правило, имеют одинаковые размеры, и отсчеты по ним производятся с одинаковой точностью.

Широко распространенные в практике астрономических определений способы, основанные на принципе равных высот (способы Цингера, Певцова, Мазаева) или на принципе измерения малой разности зенитных расстояний двух звезд (способ Талькотта), позволяющие производить точные определения широты и времени без непосредственного измерения зенитных расстояний светил. Вследствие этого надобность в точно разделенном вертикальном круге для высокоточных астрономических работ в значительной мере отпала.

Поэтому астрономическими теодолитами в настоящее время называют и такие, у которых горизонтальный и вертикальный круги имеют разные размеры и разную точность отсчитывания. Примером такого прибора является астрономический теодолит АУ 2"/10", выпускаемый заводом ЭОМЗ ЦНИИГАиК, у которого наименьшее деление шкалы микроскопа-микрометра горизонтального круга составляет 2", а точность отсчета по вертикальному кругу 10".

Таким образом, безотносительно к точности горизонтального и вертикального кругов, астрономическим теодолитом называют

такой прибор, с помощью которого можно определять все три элемента — широту, время и азимут направления наиболее распространенными способами астрономических определений.

Специфическими особенностями современного астрономического теодолита по сравнению с точными геодезическими угломерными приборами являются:

ломаная центральная труба: с помощью прибора, имеющего такую трубу, можно производить наблюдения светил и предметов на зенитных расстояниях от 0 до $110\text{--}120^\circ$, т. е. практически на любых видимых зенитных расстояниях;

улучшенная оптика: к оптике зрительных труб астрономических теодолитов предъявляются повышенные требования, так как при астрономических наблюдениях используется значительная часть поля зрения, а не только центр поля зрения, как при геодезических наблюдениях;

наличие точных уровней: астрономические теодолиты имеют, как правило, три точных уровня: накладной (подвесной) на горизонтальную ось трубы теодолита — для определения ее наклона при измерении горизонтальных направлений; накладной на раму микроскопов вертикального круга при измерении зенитных расстояний и скрепляющийся с горизонтальной осью трубы (талькоттовский уровень) — для фиксации малых изменений положения трубы по высоте при наблюдениях способами равных высот или способом Талькотта;

сетка нитей, состоящая из 7—9 равноотстоящих параллельных нитей и перпендикулярного к ним подвижного биссектора окулярного микрометра; коробка окулярного микрометра вместе со всеми нитями может поворачиваться на угол 90° ;

электроосвещение поля зрения трубы и микроскоп-микрометров горизонтального и вертикального кругов для производства ночных наблюдений;

приборы для полуавтоматических (или автоматических) наблюдений моментов прохождений звезд: контактный микрометр, электромоторный привод с редуктором для наблюдений косых прохождений звезд.

Для производства астрономических определений на пунктах 1 и 2 классов астрономо-геодезической сети Советского Союза основными приборами являются отечественные астрономические теодолиты АУ $2''/10''$, АУ $2''/2''$ и У5. Кроме того, инструкция разрешает также применять астрономические теодолиты соответствующей точности иностранных фирм.

1. Астрономический теодолит АУ $2''/10''$

Астрономический теодолит (рис. 5) предназначен для определения широт, долгот и азимутов на пунктах геодезической сети 1 и 2 классов.

Главная труба теодолита — центральная, ломаная. Объектив — двухлинзовый, просветленный. Фокусное

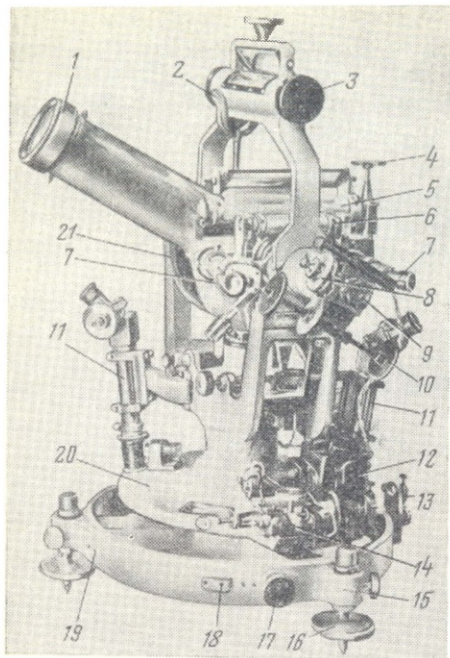


РИС. 5. Астрономический теодолит АУ 2"/10":

1 — главная труба; 2 — поддерживающая стойка накладного уровня; 3 — уровень накладной на горизонтальную ось; 4 — элевационный винт талькоттовского уровня; 5 — талькоттовский уровень; 6 — уровень алидады вертикального круга; 7 — микроскопы вертикального круга; 8 — головка контактного микрометра; 9 — контактный микрометр; 10 — рукоятки ручного привода контактного микрометра; 11 — микроскопы-микрометры горизонтального круга; 12 — электродвигательный привод с редуктором для вращения верхней части теодолита по азимуту; 13 — подвижная каретка поверительной трубы; 14 — закрепительный винт алидады; 15 — подставка; 16 — подъемные винты; 17 — выключатель освещения поверительной трубы; 18 — клеммы электропитания лампочки поверительной трубы; 19 — клеммы электропитания освещения всего теодолита; 20 — кожух горизонтального круга; 21 — кожух вертикального круга

Освещение поля зрения трубы производится от лампочки, устанавливаемой в противовесном конце оси. В окуляр свет падает через призмочку, укрепленную на гипотенузной грани поворачивающей призмы.

Фокусировка трубы производится вручную, путем перемещения окулярного колена. Пределы фокусировки — от 5 м до бесконечности.

Диаметры цапф горизонтальной оси равны 40 мм. Длина оси между рабочими сечениями цапф составляет 252 мм. Для раз-

расстояние объектива 450 мм, диаметр свободного отверстия 55 мм, разрешающая способность 2,6". Сменные окуляры с фокусными расстояниями 10 и 8 мм дают увеличение главной трубы 45 и 56×. Поле зрения трубы равно 54'.

Ось вращения трубы (горизонтальная ось теодолита) в центральной части имеет утолщение в форме куба. Внутри этого куба помещена трехгранная стеклянная призма полного внутреннего отражения. Одна грань призмы обращена к объективу, другая — к окулярному концу трубы. Пучок света от светила проходит через объектив, падает на призму и, отразившись от ее гипотенузной грани, поворачивает в сторону окуляра. Предмет в поле зрения трубы изображается так, что верх оказывается внизу, правая сторона остается справа, а левая — слева. Для установки грани призмы перпендикулярно к оптической оси трубы в кубе имеются два юстировочных винта, закручиваемых в оправу призмы.

грузки рабочих лагер на подставке трубы имеются регулируемые ложные лагеры с опорными роликами. Регулировкой пружин ложных лагер достигают равномерного давления трубы на каждую рабочую лагеру.

Фасеты рабочих лагер имеют плоскую или цилиндрическую форму.

Окулярный микрометр главной трубы обычной конструкции. Сетка нитей состоит из семи неподвижных паутиновых нитей, натянутых на колодке, и трех перпендикулярных к ним, натянутых на подвижной каретке. Среднее расстояние между неподвижными нитями около $90''$. Две из подвижных нитей представляют собой биссектор. Угловое расстояние между нитями биссектора составляет $25-30''$. Третья подвижная нить — одиночная. Она отстоит от ближайшей нити биссектора на расстоянии примерно одного оборота головки окулярного микрометра (около $115''$). Головка микрометра разделена на 100 делений. Коробку микрометра вместе с сеткой нитей можно поворачивать на 90° .

Для определения наклона горизонтальной оси на ее цапфы устанавливают накладной уровень 3, который поддерживается на ней специальной вилкой 2. Цена деления $2-2,5''$ на 2 мм шкалы.

Неравенство подставок трубы может быть исправлено двумя юстировочными винтами, расположенными на одной из подставок.

Талькоттовский уровень 5 скрепляется с горизонтальной осью посредством хомутика, снабженного закрепительным винтом. Цена деления уровня $1,2-2,0''$ на 2 мм шкалы. Уровень снабжен элевационным винтом для приведения пузырька уровня на середину.

Вертикальная ось теодолита коническая, с опорой сверху (рис. 6). Верхняя (опорная) часть оси имеет шаровую поверхность. На этой поверхности покоится промежуточная подушка, имеющая снизу коническую выточку, а сверху плоскость, на которую опирается регулировочный винт с головкой-грибком. Ограничительная гайка, навинченная на вертикальную ось ниже шаровой поверхности, предохраняет баксу от разъединения с осью.

Нанося тонкий слой специального масла на шаровую поверхность и на ось, можно добиться поворотом регулировочного винта такого зазора между осью и баксой (втулкой), при котором верх-

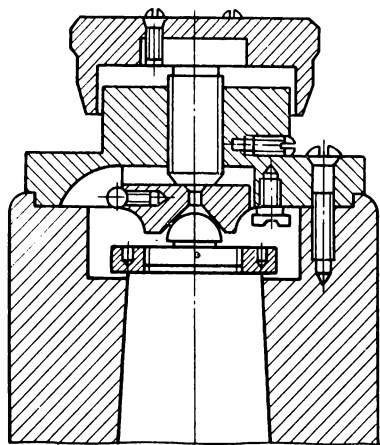


РИС. 6. Вертикальная ось теодолита АУ $2''/10''$

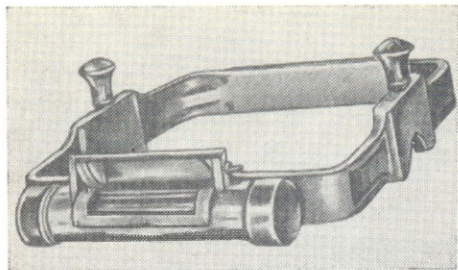


РИС. 7. Рамный уровень конструкции Л. Б. Мещанского

служит для установки верхней части теодолита по азимуту невооруженным глазом с точностью до $0,1^\circ$ по индексу, расположенному в окне кожуха алидады. Индекс можно перемещать в небольших пределах, для чего необходимо ослабить винты его крепления. Перемещением индекса устанавливают соответствие отсчетов по микроскопам-микрометрам отсчету по индексу.

Горизонтальный круг можно переставлять с помощью стержня с конической шестерней, вводимой в зацепление с кольцевой рейкой.

Сделав установку, круг закрепляют закрепительным винтом. Горизонтальный круг закрыт защитным кожухом алидады. Отсчеты по горизонтальному лимбу производятся с помощью микроскопов-микрометров 11 (см. рис. 5). Трубки микроскопов-микрометров ломаные, имеют увеличение $49\times$ и цену деления головки $2''$. Наименьший интервал лимба $5'$ равен $2,5$ оборотам винта микрометра. На подвижной каретке микроскопа-микрометра натянуты два биссектора, расстояние между которыми равно двум оборотам наводящего винта. Отсчет числа оборотов винта производится по гребенке, укрепленной на колодке и видимой в поле зрения микроскопа-микрометра. При юстировке микроскопа-микрометра гребенку можно перемещать с помощью гайки, находящейся на боковой стенке коробки микрометра.

Вертикальный лимб диаметром 135 мм имеет наименьшее деление $5'$. Градусные деления подписаны по часовой стрелке. На алидаде вертикального круга укреплены отсчетные микроскопы с верньерными шкалами. Шкала с номинальной точностью отсчета $10''$ подписана от 0 до 30 через каждые 5 делений. Увеличение микроскопов $28\times$. Вертикальный круг закрыт защитным кожухом 21 (см. рис. 5), в котором имеются два круглых отверстия для отсчетов по лимбу. На раме микроскопов вертикального круга 7 укреплен уровень с ценой деления, равной примерно $8''$. Уровень имеет исправительные винты для исправления места зенита.

П о в е р и т е л ь н а я т р у б а — прямая, используется при наблюдениях азимута со столика геодезического знака. Сво-

няя часть теодолита будет вращаться легко и без колебаний вокруг вертикальной оси.

Лимб горизонтального круга диаметром 220 мм разделен через $5'$. Подписи делений нанесены по часовой стрелке. Кроме основного кольца делений, имеется дополнительное кольцо, разделенное через 1° , с надписями через 10° . Дополнительное кольцо

бодное отверстие объектива 36 мм, фокусное расстояние 360 мм. Увеличение поверительной трубы $30\times$. Цена оборота окулярного микрометра равна примерно $140''$. Поверительная труба закрепляется в лагерах специальной каретки, которая может перемещаться по азимуту в пределах сектора между двумя подъемными винтами. К комплекту теодолита может придаваться рамный уровень конструкции Л. Б. Мещанского (рис. 7). Обычный накладной уровень позволяет поднимать трубу до зенитного расстояния $17\text{--}20^\circ$. С рамным уровнем Мещанского можно производить азимутальные наблюдения светил на зенитных расстояниях от 0 до 52° .

В комплект теодолита входят также контактный микрометр, описание которого будет дано ниже, штатив и мелкие принадлежности.

Теодолит укладывают в два ящика. Для транспортировки имеются специальные упаковочные ящики. Масса теодолита без ящиков 37 кг (12 кг верхняя часть и 25 кг нижняя), в упаковочных ящиках 71 кг, в транспортировочных ящиках 127,5 кг. Масса штатива с упаковочным ящиком 43,5 кг. Масса полного комплекта 172 кг.

2. Астрономический теодолит У5

Астрономический теодолит У5 (рис. 8) разрешается применять для определения широты и времени на пунктах астрономо-геодезической сети 1 и 2 классов способами, основанными на принципе равных высот, а также для определения широты способом Талькотта.

Для определения азимута направления на земной предмет, широты по измеренным зенитным расстояниям звезд, а также времени азимутальными способами применять универсальный теодолит У5 не разрешается.

Рассмотрим основную характеристику универсального теодолита У5.

Г л а в н а я т р у б а — центральная, ломаная. Диаметр свободного отверстия объектива 40 мм, а его фокусное расстояние 374 мм; разрешающая способность $3,5''$. Два сменных окуляра с фокусными расстояниями 9 и 12 мм дают, соответственно, увеличение 41 и $31\times$. Выходные зрачки окуляров 1,3 и 1,0 мм; поле зрения трубы $55'$.

О к у л я р н ы й м и к р о м е т р такой же конструкции, как в АУ2"/10". Сетка нитей состоит из девяти неподвижных равноотстоящих нитей с расстоянием между ними порядка $90''$ и подвижного биссектора с расстоянием между нитями $36''$. Нити биссектора, натянутые на подвижной каретке, перпендикулярны к неподвижным нитям. Головка окулярного микрометра разделена на 100 делений. Цена оборота винта окулярного микрометра составляет примерно $135\text{--}140''$. Коробка окулярного микрометра может быть повернута вместе с сеткой нитей на 90° .

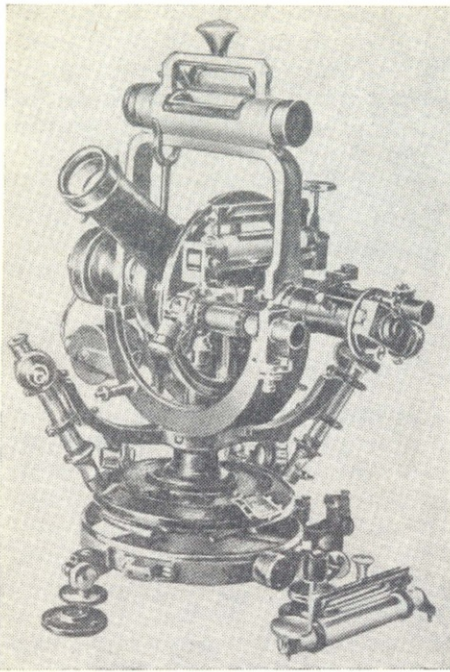


РИС. 8. Астрономический теодолит У5

лежит свободно на выступе основания вертикальной оси. Пере-
становка его осуществляется рукой. Кроме основного кольца
делений имеется дополнительное кольцо с градусными деле-
ниями.

Микроскопы - микрометры горизонтального и
вертикального круга — прямые с увеличением $32\times$. Головки мик-
рометров разделены на 60 делений. Цена одного деления $5''$. В на-
именьшем интервале лимба укладывается два оборота винта микро-
метра.

Накладной уровень с ценой деления около $3''$
устанавливается на раму микроскопов вертикального круга.

Галькоттовский уровень крепится к горизон-
тальной оси, цена деления уровня $1,5-2,5''$.

Поверительная труба для астрономических опре-
делений широты и времени не используется. Раньше она исполь-
зовалась при определении азимутов и угловых измерений на
пунктах геодезической сети 2 класса.

В комплект теодолита входит контактный микрометр такой же
конструкции, как АУ2"/10". Теодолит укладывается в два ящика,
на которые одеваются брезентовые чехлы.

Длина горизонтальной
оси между рабочими сече-
ниями цапф равна 182 мм.
Диаметр цапф 28 мм. На
ось устанавливается на-
кладной уровень с ценой
деления $4-5''$ на 2 мм.
Минимальное зенитное
расстояние главной трубы
при установленном на-
кладном уровне равно 17° .

Вертикальная
ось — коническая с опо-
рой сверху в виде шли-
фованной плоскости, в ко-
торую непосредственно
упирается нижняя тоже
шлифованная плоскость
регулируемого винта-
грибка.

Диаметры колец де-
лений горизонтального и
вертикального лимбов оди-
наковые и равны 175 мм.
Деления нанесены через
 $10'$. Надписи на лимбах
через 1° по часовой стрел-
ке. Горизонтальный круг

Масса прибора без ящиков 22 кг, с ящиками 46 кг. В комплект прибора входит разборный штатив с упаковочным ящиком (34 кг). Масса полного комплекта прибора составляет 80 кг.

3. Астрономический теодолит Вильд Т-4

Астрономический теодолит Вильд Т-4 (рис. 9) предназначен для высокоточных геодезических и астрономических наблюдений на пунктах астрономо-геодезической сети.

Зрительная труба теодолита — центральная, ломаная, с просветленной оптикой. Свободное отверстие объектива 60 мм, фокусное расстояние 550 мм, увеличение $65\times$. Окулярный микрометр имеет контактное устройство для регистрации моментов прохождений звезд с записью моментов регистрации на ленте хронографа. Коробка микрометра может быть повернута на 90° . Горизонтальная ось состоит из двух полуосей. Цапфы горизонтальной оси, изготовленные из легированной стали, имеют диаметр 40 мм. Длина горизонтальной оси между рабочими сечениями цапф составляет 350 мм.

Вертикальная ось — цилиндрическая с коническим верхним шарикоподшипником. Система вертикальной оси обеспечивает плавное и точное вращение верхней части теодолита без дополнительных регулировок при любой температуре воздуха.

Горизонтальный и вертикальный круги — стеклянные, разбивка делений лимбов произведена в градусной мере. Диаметр кольца делений горизонтального лимба 250 мм. Диаметр кольца делений вертикального лимба 145 мм. Цена наименьшего деления горизонтального лимба $2'$, а вертикального $4'$.

Отсчеты по лимбам выполняются при помощи оптических микрометров с двумя плоскопараллельными пластинками. Микрометры отдельные для горизонтального и вертикального лимбов. Оптический микрометр горизонтального лимба имеет откидывающуюся окулярную трубку. Отсчеты горизонтального и вертикального лимбов производятся

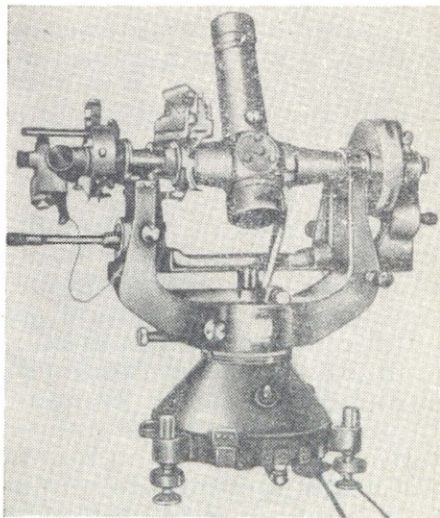


РИС. 9. Астрономический теодолит Вильд Т-4

по принципу совмещения с автоматическим образованием среднего отсчета (принцип конциденциального отсчитывания). Визирование на наблюдаемый объект и отсчет по горизонтальному лимбу производятся наблюдателем не сходя с места. Такая система отсчета значительно убыстряет процесс наблюдений по сравнению с отсчитыванием по двум микроскопам-микрометрам. Цена деления оптического микрометра горизонтального лимба составляет 0,1", а вертикального 0,2".

Рядом с окулярным микрометром имеется установочный круг (круг-искатель) для установки трубы по высоте с точностью 1'. Наличие такого круга-искателя также существенно убыстряет процесс наблюдений.

Теодолит имеет подвесной уровень на горизонтальную ось с ценой деления 1" на 2 мм. Подвесной уровень обеспечивает определение наклона горизонтальной оси при любом положении трубы по зенитному расстоянию.

Талькоттовский уровень представляет собой систему из двух спаренных ампул с параллельными осями. Цены делений талькоттовских уровней 1—2".

Уровень при вертикальном круге — контактный. Электроосвещение обеспечивает подсветку делений горизонтального и вертикального лимбов, поля зрения трубы и делений лимба искателя.

Масса теодолита в рабочем положении составляет 49,3 кг. Прибор укладывается в два ящика. Масса трубы с укладочным ящиком составляет $17,0 + 23,0 = 40$ кг. Нижняя часть теодолита с укладочным ящиком имеет массу $32,3 + 22,7 = 55$ кг; подвесной уровень в укладочном ящике с принадлежностями 8 кг.

Батарея электроосвещения в ящике — 5 кг. Штатив складной — 17,2 кг.

Общая масса комплекта составляет 125 кг.

4. Астрономический теодолит ДКМ-3А

Астрономический теодолит ДКМ-3А, изготавливаемый швейцарской фирмой Керн-Аррау, является астрономическим вариантом высокоточного теодолита ДКМ-3. Он предназначен для точных астрономических определений широты, долготы и азимута.

Особенностями астрономического теодолита ДКМ-3А являются: короткая зеркально-линзовая ломаная зрительная труба, двойные лимбы, оригинальная система горизонтирования теодолита, а также новые системы вертикальной оси и отсчетов по лимбам. Теодолит сравнительно легок, компактен, обладает высокими точностными показателями, удобен в работе и обращении. Общий вид теодолита ДКМ-3А представлен на рис. 10.

Зрительная труба теодолита зеркально-линзовая, ломаная, центральная. Оптическая система зрительной трубы изображена на рис. 11.

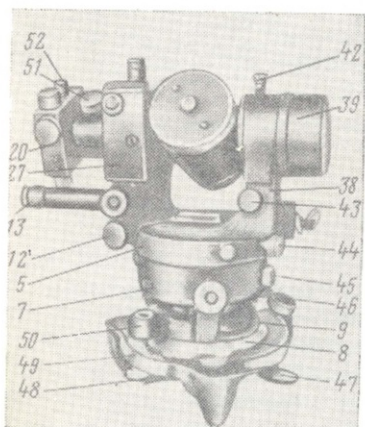
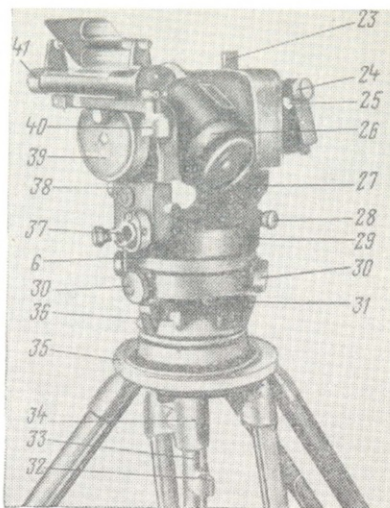
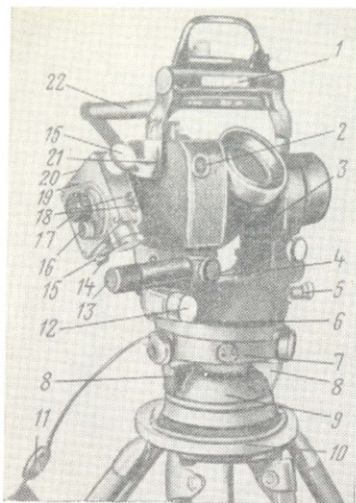


РИС. 10. Астрономический теодолит ДКМ-3А:

1 — уровень накладной, 2 — резьбовая защитная пробка юстировочных винтов уровня алидады вертикального круга, 3 — зрительная труба, 4 — цилиндрический уровень алидады для точного горизонтирования прибора, 7 — основание теодолита, 8 — выступы подставки, 9 — верхняя часть подставки, 10 — нижняя часть подставки со сферической поверхностью, 11 — выключатель электропитания, 12 — головка оптического микрометра, 13 — микроскоп оптического микрометра, 14 — лампа подсветки шкалы головки окулярного микрометра, 15 — рукоятка привода контактного микрометра, 16 — лупа для отсчитывания по шкале головки контактного микрометра, 17 — окуляр зрительной трубы, 18 — клеммы контактного устройства микрометра, 19 — резистор освещения поля зрения зрительной трубы, 20 — контактный микрометр, 21 — окно освещения

контактного уровня, 22 — осветитель шкал накладного и талькоттовского уровней, 23 — поворотная призма контактного уровня, 24 — разъем для подключения осветителя, 25 — закрепительный винт контактного микрометра, 26 — крышка гнезд подсветки зрительной трубы, 27, 38 — колонки с лагерами для горизонтальной оси, 28 — наводящий винт алидады вертикального круга, 29 — окуляр оптического центра, 30 — головки подъемных винтов, 31 — разъем для электропитания освещения прибора, 32, 50 — круглые уровни для грубого горизонтирования, 33 — механический центр, 34 — зажимная гайка станového винта, 35 — диск головки штатива, 36 — рычаг центрального замка, скрепляющего основание прибора с подставкой, 37 — иллюминатор для освещения оптического микрометра, 39 — кожух противовеса, 40 — элевационный винт талькоттовского уровня, 41 — талькоттовский уровень, 42 — закрепительный винт трубы, 43 — наводящий винт трубы, 44 — наводящий винт алидады, 45 — головка устройства перестановки горизонтального круга, 46 — защитная крышка головки, 47 — рычаг крепления верхней части подставки с нижней, жесткосвязанной центрировочной плитой, 48 — центрировочный рычаг, 49 — центрировочная плита для наблюдений со стола или со столика сигнала, 51 — рукоятка фокусирующей линзы, 52 — резистор лампы подсветки микрометра

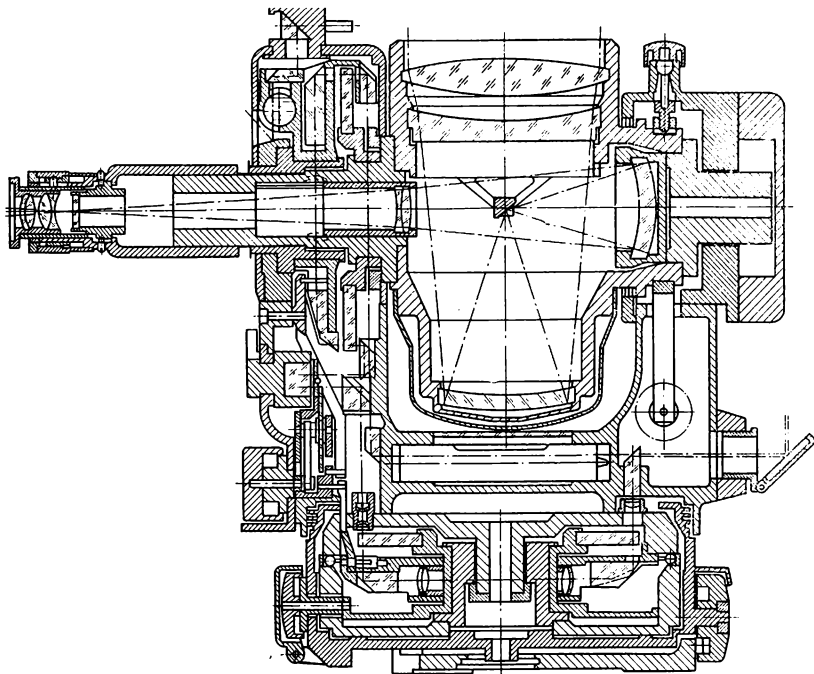


РИС. 11. Принципиальная схема оптической системы зрительной трубы теодолита ДКМ-3А

Лучи от предмета проходят через двухлинзовую систему объектива, отражаются от вогнутого сферического зеркала и падают на гипотенузную грань центральной призмы, отразившись от нее, лучи идут ко второму вогнутому зеркалу, отражаются от него, проходят фокусирующую линзу и дают прямое изображение в плоскости сетки нитей контактного микрометра. Изображение предмета и сетка нитей рассматриваются через окуляр. Фокусирование зрительной трубы осуществляется перемещением фокусирующей линзы. Труба имеет отверстие объектива 72 мм, фокусное расстояние 510 мм, увеличение трубы 46 и 27[×].

Высокое качество зеркал и линз оптической системы, большое свободное отверстие объектива и большое фокусное расстояние, конструктивные особенности системы, обеспечивающие малые потери света и большую контрастность изображения — все это позволяет наблюдать теодолитом ДКМ-3А звезды до 5-й звездной величины в сумерки, а до 2-й звездной величины — в полдень при свете яркого Солнца на угловом удалении от него свыше 30°. Возможность дневных астрономических наблюдений звезд в средних широтах имеет большое и важное значение при определениях астрономических пунктов специального назначения.

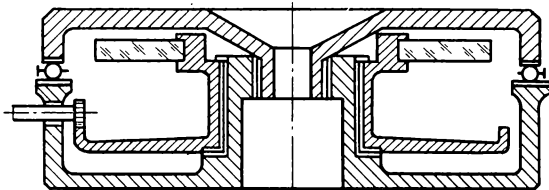


РИС. 12. Схема вертикальной оси теодолита ДКМ-3А

Вертикальная ось теодолита (рис. 12) выполнена в виде прецизионного шарикоподшипника, причем диаметр кольца подшипника равен диаметру алидадной части теодолита. Благодаря тщательному отбору комплекта шариков, оптической точности шлифовки поверхности их качения и большому радиусу кольца шарикоподшипника обеспечивается высокая стабильность системы вертикальной оси и правильность вращения верхней части прибора.

Подобная система вертикальной оси нечувствительна к изменению температуры и смазки, а также позволяет существенно уменьшить высоту прибора и обеспечить его устойчивость при сравнительно небольшой массе.

Горизонтальный и вертикальный круг — стеклянные, имеют по два concentрических ряда делений, нанесенных через $10'$. На внутренних делениях нанесены двойные штрихи, на внешних — одинарные. На основании тщательных исследований погрешностей диаметров, внутренний и внешний ряд делений взаимно ориентируются таким образом, что суммарные погрешности одноименных диаметров близки к нулю. Таким образом, применение двух concentрических рядов делений существенно уменьшает периодические погрешности диаметров лимбов.

Отсчеты по лимбам производятся с помощью оптического микроскопа. В поле зрения микроскопа одновременно видны деления вертикального V и горизонтального H лимбов и шкала оптического микроскопа (рис. 13).

Для получения отсчета по лимбу изображения одинарных штрихов оптически вводятся с помощью микроскопа в бисекторы изображения двойных штрихов. Отсчет производится по индексу, имеющему форму треугольника, и по шкале микроскопа. По индексу

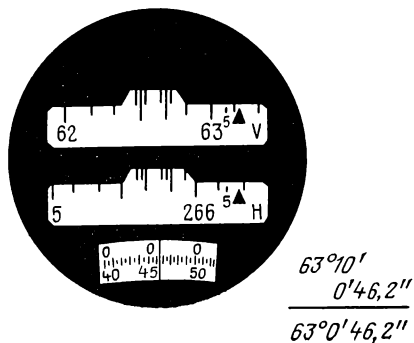


РИС. 13. Поле зрения микроскопа

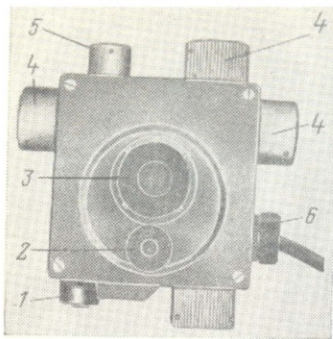


РИС. 14. Общий вид контактного микрометра теодолита ДКМ-3А:

1 — лампочка для освещения шкалы микрометра; 2 — дупа для отсчитывания шкалы головки контактного микрометра; 3 — окуляр зрительной трубы; 4 — рукоятки привода контактного микрометра; 5 — реостат освещения поля зрения трубы; 6 — вилка подключения клеммы контактного устройства микрометра к хронографу

отсчитываются значения градусов и минут, кратных 5, по шкале микрометра — дополнительно минуты от 0 до 5 и секунды до 0,1". Такая система отсчета автоматически дает среднее из двух отсчетов по диаметрально противоположным сторонам горизонтального лимба, что исключает погрешность эксцентриситета. Пример отсчета по вертикальному лимбу приведен на рис. 13.

Микроскоп оптического микрометра не связан с трубой теодолита и поэтому остается неподвижным при вращении трубы по высоте. Благодаря чему деления лимбов при любой установке зрительной трубы рассматриваются в одном и том же положении, что повышает точность измерения горизонтальных и вертикальных углов при больших наклонах визирного луча.

В теодолите ДКМ-3А, в отличие от других теодолитов, ось подъемных винтов расположены горизонтально. Вследствие этого резьба подъемных винтов не испытывает нагрузки и винты не изнашиваются. Вертикальное перемещение прибора происходит с помощью эксцентриков, укрепленных на концах подъемных винтов. Обеспечивая высокую устойчивость прибора, эта система ограничивает диапазон вертикального перемещения и поэтому необходимо выполнять предварительное горизонтирование и центрирование штатива или центрировочной плиты, на которую устанавливается теодолит.

Горизонтирование прибора осуществляется перемещением верхней части подставки по сферической поверхности нижней части подставки и контролируется по круглому уровню. После этого верхняя часть подставки жестко скрепляется с нижней зажимной гайкой.

Последующее горизонтирование производится с помощью эксцентриков подъемных винтов по уровню при алидаде горизонтального круга ($\tau = 10''$) и уровня накладного на горизонтальную ось с ценой деления $\tau = 2''$ на 2 мм. В отличие от других приборов, накладной уровень ставится только в одно положение и не перекладывается на горизонтальной оси. При измерениях горизонтальных направлений по отсчетам уровня выводится величина среднего наклона горизонтальной оси для положений теодолита при КЛ и КП. Вследствие малого размера трубы перевод ее через зенит возможен без снятия уровня.

Талькоттовский уровень ($\tau = 2''$ на 2 мм) закрепляется на конце горизонтальной оси вместо противовеса и позволяет регистрировать малые перемещения зрительной трубы по зенитному расстоянию. Уровень Талькоста состоит из двух ампул, отличающихся оцифровкой шкал (0—40 и 100—140) и снабжен элевационным винтом.

Теодолит ДКМ-3А снабжен контактным микрометром с позиционным устройством. Общий вид контактного микрометра приведен на рис. 14. Подвижная каретка микрометра с биссектором и одиночной нитью может приводиться в движение с помощью любой из четырех головок ручного привода; при наблюдениях звезд обычно используются одновременно две диаметрально противоположные головки привода.

Головка контактная микрометра имеет 10 рабочих и два опознавательных контакта. Контакты — платиновые, врезаны в боковую поверхность агатовой головки. Контактный рычаг под легким давлением скользит по боковой поверхности головки и производит замыкание и размыкание электрической цепи. Контактная пара микрометра выведена на его корпус. С помощью электрического шнура микрометр подключается к хронографу.

Во избежание излишнего износа системы контактные рычаги отводятся от контактной головки на время, когда система не используется, с помощью рычажка, расположенного позади лампы освещения шкалы микрометра. Яркость освещения шкалы и поля зрения трубы регулируется специальным реостатом.

Сетка нитей, состоящая из системы неподвижных и подвижных нитей, может поворачиваться путем вращения всего микрометра вокруг оптической оси на любой угол в пределах 90° .

При наблюдениях обычно используются два крайних ортогональных положения, соответствующих горизонтальному или вертикальному положению подвижных нитей сетки. Эти положения зафиксированы специальными упорами.

Биссектор или одиночная нить подвижной сетки (рис. 15, а) используют при наблюдениях с контактным устройством микрометра, с автоматической записью моментов наблюдений на ленте хронографа; пять параллельных нитей неподвижной сетки (рис. 15, б) для наблюдения прохождений звезд методом «глаз — ухо» или «глаз — клавиша». Для исключения из результатов наблюдений возможного остаточного наклона подвижной нити необходимо изображение звезды пропускать через центр поля зрения

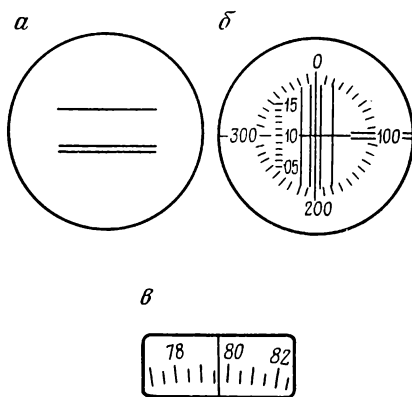


РИС. 15. Сетка нитей микрометра

трубы. Для этой цели в контактном микрометре теодолита ДКМ-3А имеется позиционное устройство, выполненное в виде круга позиционных углов на неподвижной сетке нитей (см. рис. 15, б). Для того чтобы изображение звезды пропустить через центр поля зрения трубы, достаточно развернуть верхнюю часть теодолита по азимуту, а трубу по высоте так, чтобы изображение звезды пересекло круговую шкалу позиционного устройства под углом к горизонтальной нити, равным параллактическому углу светила. Контактный микрометр работает на десяти рабочих оборотах винта. Счет целых оборотов производится по шкале, нанесенной на неподвижной сетке нитей (см. рис. 15, б). Оцифровка шкалы произведена от 5 до 15 оборотов с отсчетом в нуль-пункте, равным 10 оборотам. Доли оборота винта контактного микрометра отсчитываются по шкале контактного микрометра (рис. 15, в), рассматриваемой через лупу, расположенную рядом с окуляром зрительной трубы. Шкала контактного микрометра имеет 120 делений. Цена одного оборота равна примерно 115".

Конструкция астрономического теодолита ДКМ-3А не предусматривает никаких юстировок в полевых условиях, кроме исправления уровней. Масса теодолита в рабочем положении 14,2 кг, штатива 7,8 кг, футляра 3,9 кг. Размеры футляра 350 × × 180 × 290 мм. Теодолит упаковывается в металлический футляр, снабженный ремнем для ношения на плече.

§ 7. ТЕОДОЛИТЫ СРЕДНЕЙ ТОЧНОСТИ

Для астрономических определений широты, долготы и азимута на пунктах специального назначения, а также для приближенных определений пунктов в экспедиционных условиях обычно применяют легкие, портативные и удобные в работе оптические теодолиты.

В последние годы нашей промышленностью, а также некоторыми зарубежными фирмами производится целый ряд оптических теодолитов средней точности, которые снабжаются дополнительным комплектом деталей и приборов, позволяющих с успехом использовать эти приборы для астрономических определений широты, долготы и азимута на пунктах специального назначения.

Кратко рассмотрим основные виды подобных приборов: оптический теодолит Т-2, выпускаемый нашей промышленностью, и оптический теодолит Theo 010, выпускаемый фирмой «Карл Цейсс, Йена» (ГДР).

1. Теодолит Т-2

Теодолит Т-2 предназначен для измерения горизонтальных углов (со средней квадратической погрешностью 1,5"), вертикальных углов и астрономических определений широты, долготы и азимута.

Основные технические данные теодолита

Диаметр отверстия объектива, мм	46
Увеличение зрительной трубы	25×
Наименьшее расстояние визирования, м	1,5
Цена деления лимбов	20'
Цена деления шкалы оптического микрометра	1"
Цена деления (на 2 мм) уровня при алидаде горизонтального круга	15"
Цена деления уровня при алидаде вертикального круга	20"
Цена деления накладного уровня	10"
Цена деления уровня Талькотта	10"
Масса теодолита, кг	5,5
Масса футляра с принадлежностями, кг	4,2
Масса штатива, кг	5,3

Для астрономических определений к теодолиту Т-2 прилагается комплект приспособлений, включающий: накладной на горизонтальную ось уровень, талькоттовский уровень, астрономическую сетку нитей, зенитные окуляры для визирования на малых зенитных расстояниях (вплоть до 0°), электрооборудование для работы ночью, центрировочную плиту для установки на астрономическом столбе или на столике сигнала. Общий вид теодолита Т-2 показан на рис. 16. Теодолит состоит из двух частей: верхней (измерительной) и нижней (подставки).

Измерительная часть теодолита входит цилиндрической втулкой в гнездо подставки и закрепляется в ней винтом. В цилиндрической втулке могут вращаться независимо друг от друга вертикальная ось алидады и втулка с горизонтальным кругом. Горизонтальный круг может переставляться с помощью специальной рукоятки.

Зрительная труба теодолита — прямая, центральная, с просветленной оптической системой обычной конструкции. Диаметр свободного отверстия объектива 46 мм, увеличение 25×, фокусировка — внутренняя. Труба закреплена на горизонтальной оси, установленной во втулках колонок алидады, и может переводиться через зенит со стороны как окуляра, так и объектива. Сверху и снизу на зрительной трубе имеются оптические визиры, с помощью которых производится грубое наведение трубы на визирную цель. На зрительной трубе под одним из оптических визиров расположен рычаг, с помощью которого поворачивается зеркальце внутри трубы для подсветки поля зрения при ночных наблюдениях.

Горизонтальный и вертикальный лимбы — стеклянные, разделены по окружности через 20', градусы подписаны по часовой стрелке. Деление горизонтального лимба выполнено двойными штрихами, вертикального — одинарными.

Оптический микрометр, общий для обоих лимбов, расположен в полости колонки алидады, а окуляр отсчетного микроскопа — рядом с окуляром зрительной трубы. На предмет-

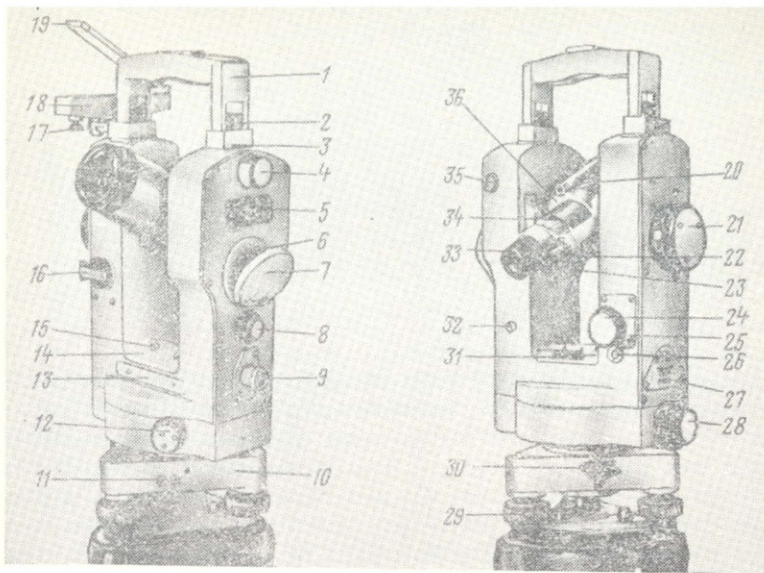


РИС. 16. Оптический теодолит Т-2:

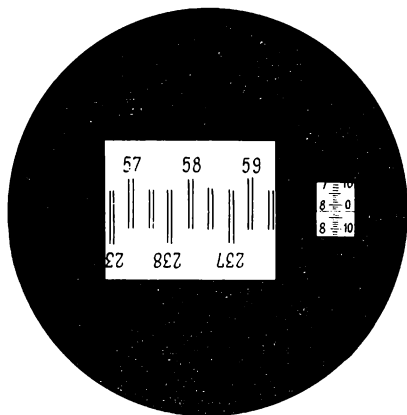
1 — скоба для установки визирной вилки и для переноса теодолита, 2 — винт скобы визирной вешки, 3 — контакт для освещения визирной вешки, 4 — поворотная призма контактного уровня, 5 — окно для подсветки контактного уровня, 6 — иллюминатор оптического микрометра, 7 — зеркало иллюминатора, 8 — закрепительный винт алидады вертикального круга, 9 — выдвигающая окулярная трубка оптического центра, 10 — подставка, 11 — клеммы для подключения электропитания, 12 — головка перестановки горизонтального круга, 13, 14, 15 — юстировочные винты оптического микрометра, 16 — рукоятка переключения оптического микрометра для отсчетов горизонтального и вертикального кругов, 17 — стопорный винт стрелки буссоли, 18 — ориентир-буссоль, 19 — зеркало буссоли, 20 — вспомогательный оптический визир, 21 — головка оптического микрометра, 22 — рукоятка регулирования освещения поля зрения трубы, 23 — окуляр отсчетного микроскопа, 24 — наводящий винт трубы (соосный с закрепительным винтом), 25 — закрепительный винт трубы, 26 — юстировочный винт уровня, 27 — уровень алидады горизонтального круга, 28 — наводящий винт алидады (соосный с закрепительным винтом), 29 — подъемные винты подставки, 30 — закрепительный винт подставки, 31 — уровень алидады горизонтального круга, 32 — гнездо разъема для подключения осветителя, 33 — фокусирующее кольцо сетки нитей, 34 — фокусирующее кольцо трубы, 35 — резьбовая защитная пробка юстировочных винтов контактного уровня, 36 — ложные цапфы для фасет подставок накладного уровня

ную плоскость отсчетного микроскопа передаются по двум оптическим каналам изображения диаметрально противоположных штрихов горизонтального или вертикального лимба. Переключение этих каналов осуществляется с помощью специальной рукоятки. Отсчет по кругу производится путем совмещения диаметрально противоположных штрихов лимба вращением головки оптического микрометра. Вместе с головкой оптического микрометра движется оцифрованная шкала микрометра, которая видна в правой стороне поля зрения отсчетного микроскопа. Шкала имеет 600 делений, цена одного деления равна 1". Минуты и десятки секунд подписаны. Поле зрения отсчетного микроскопа

и пример отсчета по горизонтальному кругу приведены на рис. 17. Для исключения влияния на отсчет возможного мертвого хода оптического микрометра рекомендуется совмещать штрихов производить всегда ввинчиванием головки микрометра.

Перед отсчетом по вертикальному кругу необходимо совместить изображения концов пузырька контактного уровня при алидаде вертикального круга. Для юстировки уровня служат винты, защищенные резьбовой пробкой. Ампула уровня вертикального круга делений не имеет.

Для точного центрирования теодолита над центром пункта в корпус алидады вмонтирован оптический центрир, выдвигаемая окулярная трубка которого расположена в колонке алидады, а объектив — в полости вертикальной оси теодолита. Вращением оправы окуляр устанавливается до резкой видимости сетки нитей. Фокусирование оптического центрира производится передвижением окулярного колена.



Отсчет
57°58'02''

РИС. 17

2. Теодолит Theo 010

Назначение оптического теодолита Theo 010 такое же, как и оптического теодолита Т-2.

Основные технические данные теодолита

Диаметр отверстия объектива, мм	53
Увеличение зрительной трубы	31×
Наименьшее расстояние визирования, м	2
Цена деления лимбов	20'
Цена деления шкалы оптического микрометра	1"
Цена деления уровня при алидаде горизонтального круга	20"
Цена деления уровня при алидаде вертикального круга	20"
Цена деления накладного уровня	10"
Цена деления талькоттовского уровня	10"
Масса теодолита, кг	5,3
Масса футляра с принадлежностями, кг	5,0
Масса штатива, кг	5,6

Для астрономических определений широты, долготы и азимута к теодолиту по требованию может придаваться комплект дополнительных приспособлений, таких же, как и к теодолиту Т-2.

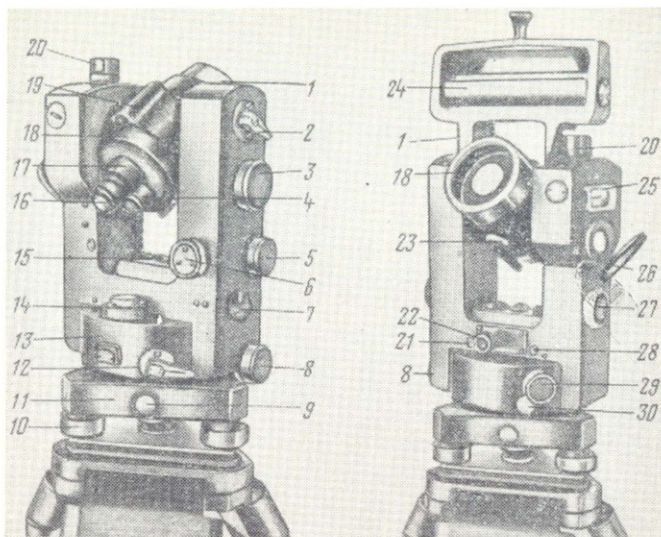


РИС. 18. Оптический теодолит Theo 010:

1 — предохранительная стойка накладного уровня, 2 — закрепительный рычаг трубы, 3 — головка оптического микрометра, 4 — окуляр оптического микрометра, 5 — наводящий винт трубы, 6 — переключатель кругов оптического микрометра, 7, 21, 28 — защитные пробки юстировочных винтов оптического микрометра, 8 — наводящий винт алидады, 9 — закрепительный винт подставки, 10 — подъемные винты подставки, 11 — подставка, 12 — закрепительный рычаг алидады, 13 — верхняя измерительная часть теодолита, 14 — круглый уровень, 15 — цилиндрический уровень, 16 — фокусирующее кольцо сетки нитей, 17 — фокусирующее кольцо зрительной трубы, 18 — зрительная труба, 19 — оптический визир, 20 — поворотная призма контактного уровня, 22 — окуляр оптического центра, 23 — головка для регулирования освещения поля зрения трубы, 24 — накладной уровень, 25 — окно освещения контактного уровня, 26 — зеркало подсветки оптического микрометра, 27 — наводящий винт алидады вертикального круга, 29 — головка перестановки вертикального круга, 30 — стопорный сектор головки

Общий вид оптического теодолита Theo 010 показан на рис. 18. Теодолит Theo 010 можно применять для измерения углов по трехштативной системе. Поэтому верхнюю часть прибора (измерительную) можно вынимать из подставки (нижней части) и переносить независимо от нее. В цилиндрической втулке верхней части могут вращаться независимо друг от друга вертикальная ось алидады и втулка с горизонтальным кругом. Горизонтальный круг можно переставлять с помощью включаемой зубчатой трубки. Головка защищена от случайного включения.

Отличительной особенностью теодолита Theo 010 является зеркально-линзовая зрительная труба типа Кассегрена, с передней афокальной линзовой системой. Благодаря этой оптической системе труба имеет весьма малую длину (135 мм), а сам теодолит приобретает компактный вид. Диаметр свободного отверстия объ-

ектива 53 мм. Увеличение трубы $31\times$, угол поля зрения $1,2^\circ$, фокусировка — внутренняя. Труба закреплена на горизонтальной оси, установленной во втулках колонок алидады, и может переводиться через зенит со стороны как окуляра, так и объектива. Сверху и снизу на зрительной трубе имеются оптические визирные, с помощью которых производится грубое наведение трубы на визируемую цель. Яркость освещения поля зрения трубы может быть установлена в соответствии с яркостью объекта наблюдения с помощью головки, расположенной на трубе вблизи объектива, регулирующей положение зеркальца в корпусе зрительной трубы.

Для наблюдений светил на малых зенитных расстояниях используются очень удобные специальные зенитные окуляры, которыми заменяются обычные окуляры зрительной трубы и микроскопа оптического микрометра.

Горизонтальный и вертикальный круги — стеклянные, разделены через $20'$. Деление обоих лимбов выполнено двойными штрихами. Диаметр горизонтального лимба 84 мм, вертикального 60 мм.

Оптический микрометр не имеет принципиальных отличий от оптического микрометра теодолита Т-2. Отсчет по лимбам производится точно таким же образом, как в теодолите Т-2.

Накладной уровень на горизонтальную ось устанавливается на узкие латунные кольца, расположенные между трубой и колонками алидады.

По отсчетам накладного уровня определяется средняя величина наклона горизонтальной оси для двух положений инструмента (КЛ и КП).

Талькоттовский уровень применяется для астрономических определений широты и времени способами равных высот. Талькоттовский уровень укрепляется на выступе в виде ласточкиного хвоста, расположенном в середине трубы теодолита Theo 010. С помощью этого уровня фиксируются малые изменения положения трубы по высоте, закрепленной зажимным винтом на данном зенитном расстоянии.

Опытные и производственные астрономические определения широты, долготы и азимута, выполненные оптическим теодолитом Theo 010, характеризуются сравнительно высокой точностью определяемых величин. Теодолит Theo 010 может быть рекомендован для приближенных астрономических определений.

§ 8. ЗЕНИТ-ТЕЛЕСКОП

Зенит-телескоп — прибор, предназначенный для определения широты и времени способами, основанными на принципе равных высот (способы Цингера, Певцова, Мазаева), а также широты по измеренным малым разностям зенитных расстояний пар звезд (способ Талькотта).

Характерными конструктивными особенностями зенит-телескопа (рис. 19) являются:

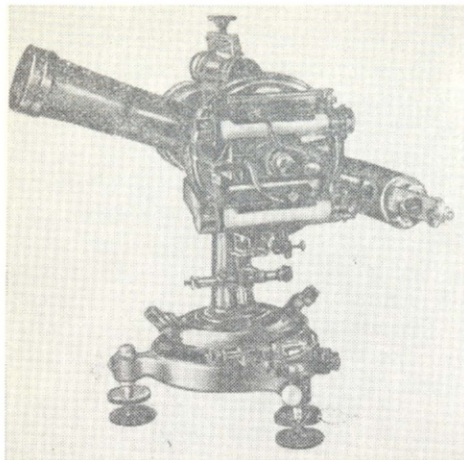


РИС. 19. Зенит-телескоп

го же типа, как в астрономическом теодолите;

талькоттовский уровень — точный, с ценой деления $1-1,5''$ на 2 мм; часто талькоттовский уровень делается спаренным из двух ампул, что увеличивает точность определения смещения трубы по высоте;

горизонтальная ось прибора короткая; на ось устанавливается небольшой накладной уровень для предварительного горизонтирования прибора; окончательное горизонтирование производится с помощью талькоттовского уровня.

В настоящее время для астрономических определений широты и времени на пунктах 1 и 2 класса зенит-телескоп применяется сравнительно редко.

Однако следует отметить, что для наблюдений способами Талькотта, Цингера, Певцова, Мазаева зенит-телескоп должен давать принципиально более точные результаты, чем астрономический теодолит с обычной конической осью. Длинная вертикальная ось обеспечивает более правильное вращение верхней части зенит-телескопа и, следовательно, величины отклонений трубы по высоте и соответствующие поправки за уровень будут меньше.

§ 9. ПРИЗМЕННАЯ АСТРОЛЯБИЯ

Призменная астролябия — астрономический прибор оригинальной конструкции, предназначенный для наблюдений прохождений светил через один и тот же альмукантарат.

Конструктивные особенности призменной астролябии позволяют производить наблюдения светил только на одном заданном зенитном расстоянии, обычно $z = 30^\circ$ или $z = 45^\circ$. С помощью

призменной астролябии можно производить определения широты и времени способом равных высот. Для других способов его применять нельзя.

Принципиальная схема призменной астролябии представлена на рис. 20.

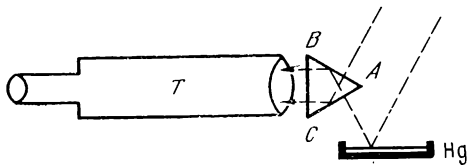


РИС. 20. Принципиальная схема призменной астролябии Клода и Дриенкура

Основными частями призменной астролябии являются:

горизонтальная труба T , насаженная на вертикальную ось, вокруг которой она может поворачиваться для установки ее в надлежащем азимуте с точностью до $0,1^\circ$;

призма ABC с тремя оптически полированными гранями AB , BC и AC ; призма прикреплена к объективу трубы так, чтобы прилегающая к нему грань BC была вертикальна; углы между гранями призмы равны 60° ;

ртутный горизонт Hg , образуемый поверхностью ртути, налитой тонким слоем в плоскую чашку, которая укрепляется на специальном приливе верхней части прибора.

Принцип наблюдений светил с помощью призменной астролябии состоит в следующем.

Прибор устанавливают таким образом, чтобы труба была горизонтальной, грань BC перпендикулярна к визирной линии трубы, главное сечение призмы вертикально. Тогда лучи от какой-либо звезды, находящейся на зенитном расстоянии 30° , входят в горизонтальную трубу:

1) падая под прямым углом на грань BA , отражаются от грани AC и входят в нижнюю часть объектива;

2) падая на ртутный горизонт, затем, отражаясь от него, попадают на грань AB , пройдя под прямым углом через грань AC и отражаясь от грани AB , входят в верхнюю часть объектива.

Так как оба луча, проходящие через грань BC перпендикулярно к ней, параллельны между собой, то в фокальной плоскости трубы от этих лучей получится одно изображение. Но если звезда еще не достигла зенитного расстояния в 30° , то в поле зрения трубы получится два изображения, которые будут сближаться и совпадут в тот момент, когда звезда достигнет зенитного расстояния в 30° , а затем снова начнут расходиться. Задача наблюдателя состоит в том, чтобы заметить по хронометру момент совпадения двух изображений звезды. Таким образом наблюдают n звезд в одном альмукантарате.

Детальный анализ приборных погрешностей показывает, что не требуется особой точности как во взаимном расположении частей прибора, так и в его установке для получения одного и того же зенитного расстояния при наблюдении всех n звезд серии. Для правильной установки призмы, чтобы грань BC была перпен-

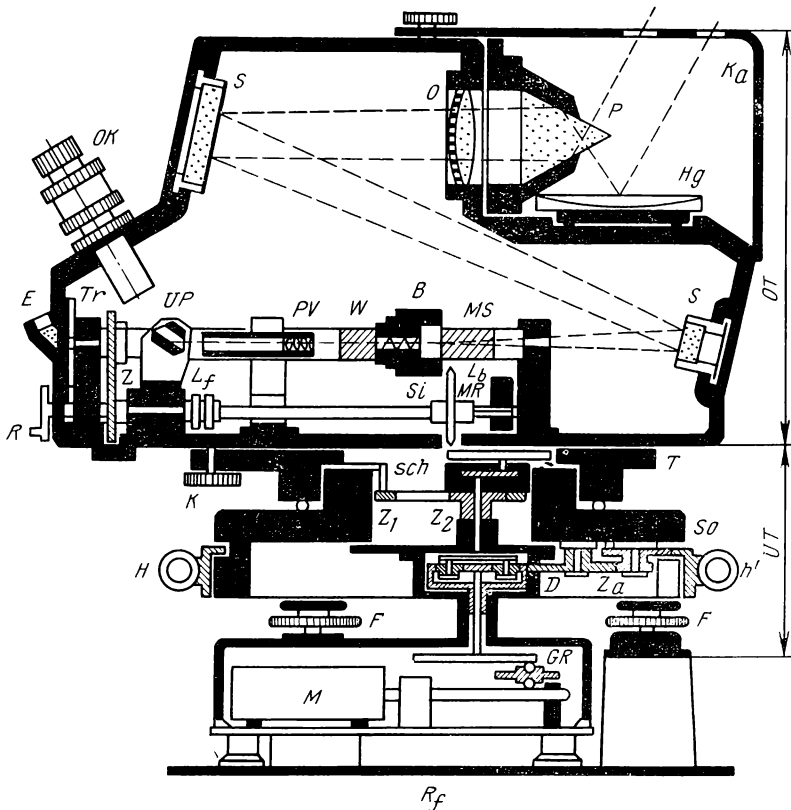


РИС. 21. Принципиальная схема призенной астролябии Данжона

дикулярна к визирной оси трубы, используется довольно точный принцип автоколлимации.

При работе с призенной астролябией направление отвесной линии определяется оптически при помощи ртутного горизонта с такой же точностью, как и направление на звезду. Комбинация ртутного горизонта и призмы практически обеспечивает наблюдение всех звезд на одной и той же высоте.

Таксы несомненные достоинства призенной астролябии, изобретенной в 1905 г. французами Клодом и Дриенкуром.

Наряду с этим имеются и существенные недостатки астрономических определений этим прибором, которые оказывают решающее влияние на качество наблюдений. Основной из них состоит в том, что регистрация момента по хронометру производится лишь для одного совпадения двух изображений наблюдаемой звезды. Это приводит к большим случайным и систематическим погрешностям наблюдений. Установлено также, что вследствие утомления глаза возможны наблюдения внефокальных совпадений изображений

звезд, что также приводит к систематическим погрешностям. Поэтому призмная астролябия Клода и Дриенкура не получила распространения в нашей стране.

В пятидесятые годы нашего столетия французский астроном Данжон произвел коренное усовершенствование призмной астролябии Клода и Дриенкура.

Призмная астролябия Данжона (рис. 21) имеет верхнюю и нижнюю части.

Нижняя часть UT , покоящаяся на трех установочных винтах F , состоит из цоколя S_0 опоры T , вращаемой по азимуту вокруг вертикальной оси прибора, и частидвигающего механизма контактного микрометра, корректирующего кольца HH и передаточного механизма Z, D, sch .

Верхняя часть OT соприкасается с опорой в трех точках, из которых одна (подъемный винт K) может перемещаться по высоте, позволяя изменить в небольших пределах наклон верхней части.

Свет от звезды попадает в объектив двумя отдельными пучками, как и в астролябии Клода и Дриенкура: один пучок непосредственно через призму P , другой — после отражения от ртутного горизонта Hg . Далее оба пучка направляются зеркалами SS на промежуточные детали оптической системы MS, W, PV и через поворачивающую призму UP попадают на фокальную плоскость окуляра OK .

Объектив прибора имеет диаметр входного отверстия 100 мм и фокусное расстояние 1000 мм. Призма — равносторонняя, со стороной 100 мм крепится в оправе и имеет три юстировочных винта. Шлифовка углов призмы производится с точностью $2''$. Призма и чашка с ртутью прикрыты кожухом K_a , который во время наблюдений предохраняет поверхность ртути от движения воздуха. Кожух имеет отверстия для входа лучей от светила.

В оптическую систему прибора Данжон ввел призму Волластона, чем устранил оба решающих недостатка астролябии Клода и Дриенкура. Призма Волластона составлена из двоякопреломляющего кварца (рис. 22). Она разделяет всякий падающий на нее луч света на два перпендикулярно друг к другу поляризованных луча, которые образуют между собой угол, зависящий от угла призмы. На рис. 23 схематически изображен ход лучей. Призма Волластона W , которая изображена здесь только как перпендикулярная к оптической оси линия, находится на месте фокальной плоскости. Она разделяет каждый из лучей d и q на два поляризованных луча, соответственно d' и d^- , q' и q^- .

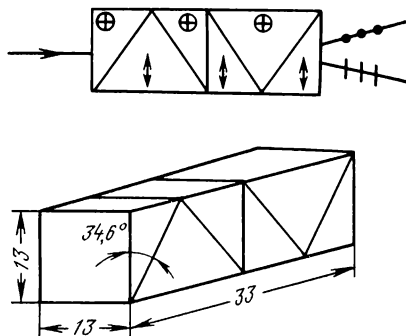


РИС. 22. Четырехкратная призма Волластона

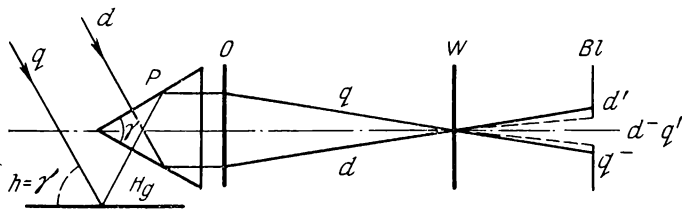


РИС. 23. Призма Волластона и ход лучей в астролябии

При надлежащем подборе угла раздвоения призмы лучи d' и q' идут параллельно один другому и изображения D^- и Q' совпадают, как это было с изображениями D и Q в фокальной плоскости астролябии Клода и Дриенкура.

Лучи d' и q' удаляются диафрагмой Bl .

Так как лучи d' и q' параллельны и совпадают, то нет никакого различия между фокальными и внефокальными изображениями.

Этим устраняется один из двух главных недостатков астролябии Клода и Дриенкура.

Благодаря наличию призмы Волластона оказалось возможным снабдить астролябию контактным микрометренным устройством с автоматической записью моментов наблюдений светила на высотах, близких к конструктивной высоте $h = \gamma$. На рис. 24 показано, что призма Волластона W может быть отодвинута от фокальной плоскости на величину i , причем при каждом ее промежуточном положении лучи d' и q' от светила, приходящие с соответствующей высоты $h' = \gamma \pm kl$ (где k — инструментальная постоянная), выходят из призмы параллельными и совпадающими. Передвигая призму вдоль оптической оси, можно так компенсировать движение звезды по высоте, что в поле зрения оба изображения D^- и Q' остаются совпадающими. С передвигающим призму устройством соединено контактное устройство, которое в определенных положениях призмы замыкает или размыкает электрическую цепь и производит автоматическую регистрацию наблюдений на ленте хронографа, на которой также отмечаются секундные сигналы хронометра.

Расшифрованные значения моментов наблюдения T_i соответствуют высотам $h_i = \gamma \pm kl_i$, а их среднее арифметическое $T_{cp} = \frac{\sum T_i}{n}$ предварительно исправленное за ускорение движения звезды по высоте, дает время прохождения звезды через альму-кantarат $h_{cp} = \frac{\sum h_i}{n}$.

Таким образом, астролябия Данжона позволяет получать n автоматически зарегистрированных моментов наблюдений звезды ($n \geq 24$), причем свободных от систематических личных погрешностей наблюдателя. Так устраняется второй основной недостаток астролябии Клода и Дриенкура.

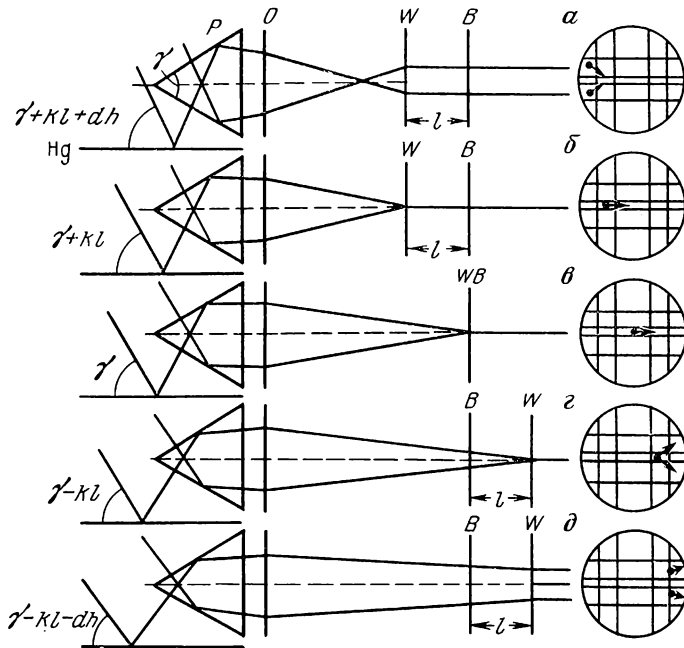


РИС. 24. Работа безличного микрометра при наблюдении прохождения звезды

Передвижение призмы Волластона вдоль оптической оси осуществляется с помощью винта микрометра $M\bar{R}$ (см. рис. 21). С винтом микрометра соединена головка Tr , оцифровка которой видна в окно E , и контактное колесо для безличной регистрации перемещения призмы. Вращение винта при наблюдениях производится мотором, но его можно осуществлять и корректировать вручную с помощью рукоятки R и корректирующего кольца HH . Скорость вращения винта регулируется автоматически в зависимости от скорости изменения высоты светила.

Опыт наблюдений с призмной астролябией Данжона показывает, что этот прибор дает весьма высокие по точности результаты. Однако прибор громоздок, к нему необходим большой комплект электропитания. Поэтому пока он используется в основном для наблюдений в стационарных условиях обсерваторий и служб времени.

§ 10. ПАССАЖНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Пассажный инструмент предназначен для определения времени, широты и азимута направления из наблюдений прохождений светил через данный вертикал. Для определения времени пассажных

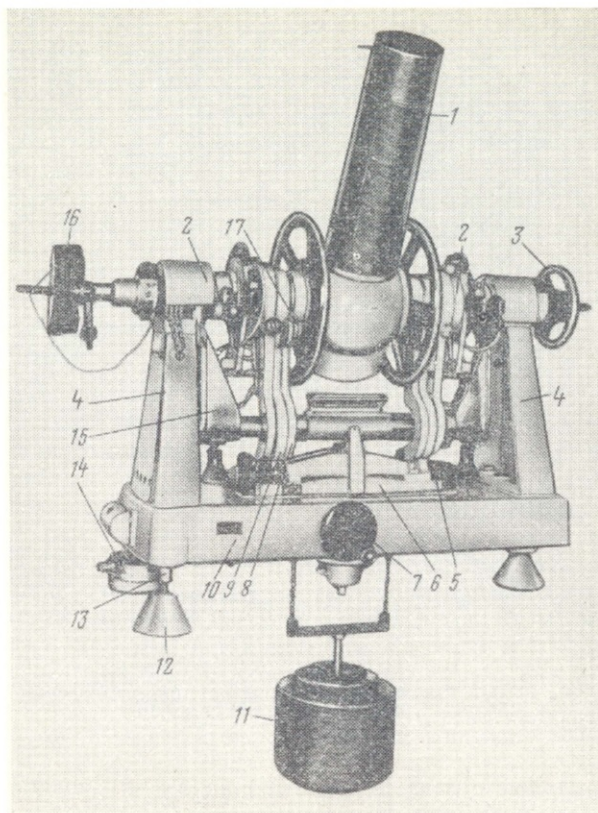


РИС. 25. Пассажный инструмент АПМ-10

инструмент ориентируется в меридиане; для определения широты — в первом вертикале, для определения азимута направления — в вертикале местного предмета. В практике астрономических работ нашей страны пассажный инструмент применяется преимущественно для определений долгот основных и фундаментальных пунктов, а также для точных определений времени в обсерваториях и службах времени. Для астрономических определений на пунктах астрономо-геодезической сети 1 и 2 класса пассажный инструмент не применяется вследствие его громоздкости и большой массы. Общий вид пассажного инструмента АПМ-10 отечественного производства представлен на рис. 25.

Основные технические данные пассажного инструмента

Диаметр отверстия объектива, мм	100
Фокусное расстояние объектива, мм	1000
Увеличение трубы	100, 140 и 200×

Цена оборота винта контактного микрометра	82,5"
Цена деления (на 2 мм) подвешного уровня	1"
Точность отсчета по вертикальному кругу (искателю)	1'
Расстояние между рабочими сечениями цапф, мм	700
Масса прибора в рабочем положении, кг	280

Назначение пассажного инструмента определяет особые требования к его устройству.

Основным условием получения высокоточных результатов астрономических определений с помощью пассажного инструмента является его устойчивость по азимуту, неизменность плоскости визирования в течение времени, необходимого для наблюдений прохождений n звезд, служащих для вывода поправки часов, широты или азимута. Выполнение указанного условия обеспечивается как конструктивными особенностями пассажного инструмента, так и фундаментальным астрономическим столбом, на котором устанавливается прибор.

Труба переносного пассажного инструмента 1 — ломаная, центральная, обеспечивающая наблюдения звезд практически на всех видимых зенитных расстояниях. Оптика трубы просветленная. Большое фокусное расстояние объектива обеспечивает стабильность положения визирной оси. Для защиты от неравномерного нагрева объективный конец трубы снабжен теплоизоляционным кожухом.

Горизонтальная ось пассажного инструмента длинная, что ослабляет влияние погрешностей цапф на правильность вращения трубы в плоскости данного вертикала. Расстояние между рабочими сечениями цапф горизонтальной оси современных переносных приборов составляет 700—800 мм. Особое внимание уделяется правильной круговой форме цапф горизонтальной оси. Современные технические условия обработки и шлифовки цапф позволяют выполнить их с погрешностями, не превышающими десятой доли микрометров.

Горизонтальная ось лежит своими цапфами 2 в лагерах массивных подставок 4 , укрепленных на тяжелой металлической станине 10 , являющейся основанием прибора. Большая масса станины и подставок придает устойчивость прибору в плоскости данного вертикала.

Станина снабжена тремя подъемными винтами 13 с подпятниками 12 . Один из подпятников имеет подвижную пластинку 14 , которую можно перемещать с помощью наводящего винта. При вращении этого винта весь прибор может в незначительных пределах перемещаться по азимуту, вращаясь на острие неподвижного винта. Это дает возможность уточнить ориентирование прибора в плоскости заданного вертикала.

Прибор имеет подъемный механизм для перекидки горизонтальной оси вместе с трубой в лагерах. Перекидка оси в лагерах необходима для наблюдений звезд при двух положениях оси прибора, что позволяет исключить из результатов азимутальных на-

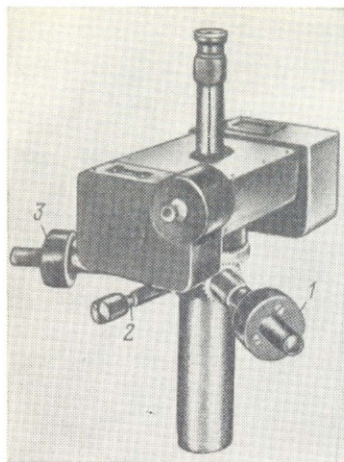


РИС. 26. Контактный микрометр пассажного инструмента

повернута на 180° и затем вновь уложена в лагера. Сигнальная лампочка 5 на станине показывает правильность установки горизонтальной оси после поворота ее на 180° , что практически исключает возможность неправильной установки прибора по азимуту при укладке оси в лагерах.

Для определения наклона горизонтальной оси на цапфы подвешивается точный подвесной уровень ($\tau = 1''$ на 2 мм). Ампула уровня заключена в стальную оправу 15 и имеет для юстировки четыре винта. Чтобы отсчитать показание уровня, следует нажать кнопку распределительной коробки, в результате чего зажигаются две лампочки, освещающие снизу пузырек уровня.

Горизонтального круга пассажный инструмент не имеет. Вертикальный круг — грубый (круг-искатель), служит для установки трубы на заданное зенитное расстояние. Круг наглухо крепится с горизонтальной осью. Алидада круга-искателя имеет два установочных устройства. На головках наводящих винтов этих устройств устанавливаются отсчеты, равные числу минут дуги зенитного расстояния звезды. Для установки трубы по зенитному расстоянию ее поворачивают по высоте, так чтобы индекс установочного устройства совпал с делением вертикального круга, соответствующим числу целых градусов зенитного расстояния звезды. Наблюдение прохождений звезд современным пассажным инструментом осуществляется с помощью контактного микрометра 6 или фотоэлектрической насадки на окулярную часть прибора.

Общий вид контактного микрометра показан на рис. 26. На оси наводящего винта укреплена агатовая головка с восьмью

блюдений звезд влияние коллимационной ошибки и неравенства диаметров цапф.

На основании подъемного механизма 6 укреплены неподвижные стойки 8, в пазах которых могут перемещаться подвижные стойки 9, несущие вилки с двумя парами роликов 17. Вилки с роликами играют роль ложных лагерь и поддерживают горизонтальную ось трубы, чем достигается уменьшение давления цапф на лагера. Противовес 11, связанный с подвижными стойками, несущими ролики, уменьшает давление горизонтальной оси на лагера. Вращением головки установочного приспособления 7 горизонтальная ось трубы может быть поднята из лагерь, а с помощью штурвала 3

контактами. В контактное устройство, кроме того, входят две скользящие пружины и контактный рычаг.

Подвижная нить контактного микрометра перемещается вращением головок ручного привода 1 и 3. С помощью винта 2 головки могут быть закреплены при любом положении трубы, что позволяет наблюдателю устанавливать их при наблюдениях звезд в наиболее удобном положении.

§ 11. КОНТАКТНЫЙ МИКРОМЕТР

Контактный микрометр — прибор, служащий для наблюдений прохождений светил полуавтоматическим методом.

В основу устройства контактного микрометра положен обычный окулярный микрометр астрономического теодолита, к которому добавлены ручной привод для плавного вращения наводящего винта и контактное устройство, связанное электрической цепью с регистрирующим устройством хронографа.

Процесс наблюдений с контактными микрометром состоит в том, что наблюдатель, плавно вращая рукоятку ручного привода, удерживает подвижную нить микрометра на изображении звезды в пределах двух-трех оборотов винта. Интервал наблюдений, как правило, обозначен в поле зрения ограничительными нитями. Для наблюдений звезд зенитальными способами подвижная нить контактного микрометра устанавливается в горизонтальное положение, а для наблюдений азимутальными способами — в вертикальное положение.

В результате таких наблюдений на ленте хронографа вместе с записью показаний контактного хронометра производится автоматическая запись замыканий или размыканий тока в цепи контактного устройства микрометра. После соответствующей расшифровки ленты можно установить показания хронометра в моменты замыканий (или размыканий) цепи контактного микрометра.

Применение контактного микрометра позволяет значительно (на целый порядок) уменьшить величину личной погрешности наблюдателя, характерной для наблюдений прохождений светил через неподвижные нити сетки методом «глаз—ухо» и, что самое главное, почти полностью исключить изменение личной погрешности с течением времени.

Вследствие указанных достоинств контактный микрометр иногда называли безличным. Однако следует иметь в виду, что это чисто условное название. При наблюдениях с контактными микрометром из процесса наблюдений исключается орган слуха наблюдателя, но орган зрения — глаз участвует в наблюдениях в полной мере, и поэтому личная погрешность визирования на светило остается. Несмотря на малость этой погрешности, в точных астрономических определениях ее необходимо определять и учитывать в результатах наблюдений.

Контактный микрометр был предложен и разработан в конце XIX века известным механиком Репсольдом для определения времени с помощью пассажного инструмента.

В 1930 г. военный геодезист Ч. Ю. Витоженец применил контактный микрометр для наблюдений способом Цингера с помощью астрономического теодолита. В 1934 г. подобные наблюдения были выполнены в ЦНИИГАиК астрономами П. Н. Долговым и В. Г. Шапошниковым, причем для наблюдений косых прохождений звезд ими был применен контактный микрометр со специальным позиционным устройством.

Дальнейшая разработка вопросов применения контактного микрометра для наблюдений способами Цингера и Деллена проводилась в ЦНИИГАиК А. П. Колупаевым, который предложил обоснованную методику исключения погрешностей микрометра (наклона и коллимации подвижной нити) при определении времени по способу Цингера.

А. П. Колупаев сконструировал приспособление к контактному микрометру для приведения подвижной нити микрометра в горизонтальное положение с погрешностью до $5'$. Методика ЦНИИГАиК рекомендуется Инструкцией 1966 г. для определения времени способами Цингера и Деллена.

Однако ни позиционное устройство П. Н. Долгова, ни методика ЦНИИГАиК не решила вопроса регистрации прохождения звезд с контактным микрометром в любых произвольных азимутах. Как указывалось выше, в астрономическом теодолите ДКМ-ЗА дано оригинальное решение этого вопроса путем применения простого позиционного устройства в виде круга позиционных углов на неподвижной сетке нитей (см. рис. 15, б). Другим возможным решением наблюдений косых прохождений звезд с помощью контактного микрометра является применение электромоторного привода для вращения прибора по азимуту — при наблюдениях зенитальными способами, и трубы по высоте — при наблюдениях азимутальными способами. При этом для наблюдений косых прохождений звезд с помощью контактного микрометра не требуется применение специальных позиционных устройств. Подробно указанная методика наблюдений с контактным микрометром будет рассмотрена ниже, при изучении конкретных способов астрономических определений.

В настоящее время применяются два основных вида контактных микрометров для астрономических теодолитов:

- 1) контактный микрометр ЦНИИГАиК с позиционной сеткой нитей для наблюдений по способу Цингера и Деллена [32];
- 2) обычный контактный микрометр без позиционного устройства.

Мы остановимся на кратком описании второго. Общий вид этого микрометра изображен на рис. 27. Контактный микрометр изготовлен на базе окулярного микрометра теодолита АУ2"/10".

РИС. 27. Контактный микрометр астрономического теодолита АУ 2/10

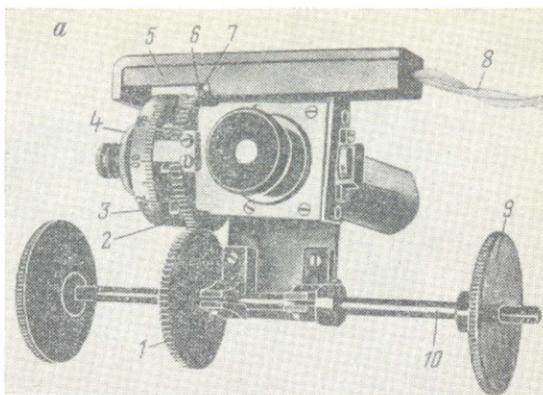
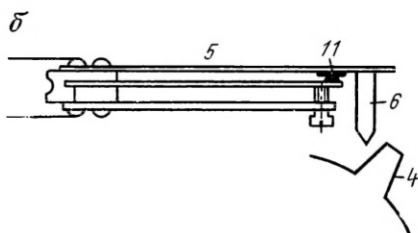
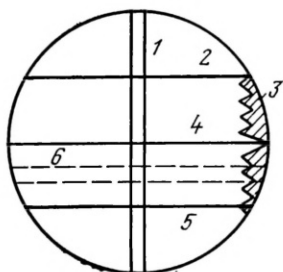


РИС. 28. Сетка нитей контактного микрометра



Контактное устройство микрометра состоит из контактного барабана 2 (рис. 27, а) и двух контактных пластинок 5, изолированных друг от друга. На концах пластинок имеются клеммы, к которым подведен шнур 8 для присоединения микрометра к хронографу.

Замыкание (размыкание) электрической цепи «батарея-микрометр-хронограф» происходит через контакты 11, укрепленные на концах контактных пластинок. Контактный барабан 2 скреплен с тыльной стороны головки счетного устройства 3. На ободке контактного барабана закреплена кольцевая цилиндрическая шестерня 7. Контактный барабан имеет девять контактных выступов 4, расположенных через $1/10$ оборота барабана. На месте десятого отсутствующего контактного выступа образуется двойной промежуток между контактами. Этот промежуток позволяет при расшифровке ленты опознать начало оборота и вести счет контактов в пределах одного оборота барабана.

При вращении наводящего винта каждый из выступов контактного барабана последовательно касается штифта 6, укрепленного на верхней контактной пластинке, слегка отжимает ее и тем самым размыкает электрическую цепь. Вращение контактному барабану и наводящему винту передается от оси ручного привода 10 через шестерни 1 и 7 с передаточным числом 1 : 1.

Ось ручного привода приводится в движение вручную рукояткой 9.

Сетка нитей микрометра, изображенная на рис. 28, состоит из трех неподвижных нитей 2, 4, 5 подвижного биссектора 6 и перпендикулярного к ним неподвижного биссектора 1. Нить 4 — средняя нить, соответствующая нуль-пункту гребенки 3; нити 2 и 5 — ограничительные, отстоящие от средней на два оборота винта. Одна из нитей подвижного биссектора 6 используется для визирования на звезду. Нити неподвижного биссектора 1 служат для контроля правильности установления скорости вращения и стабильности работы механизма вращения прибора по азимуту или высоте. При биссецировании звезда не должна выходить за нити неподвижного биссектора 1 во все время ее регистрации. Расстояние между нитями неподвижного биссектора составляет около 100". При максимальном удалении звезды от середины биссектора на 50" влияние небольшого наклона подвижной нити микрометра является пренебрегаемо малым в выводе среднего момента наблюдения. Контактный микрометр можно применять для наблюдений как зенитальными, так и азимутальными способами. В первом случае подвижная нить контактного микрометра ставится в горизонтальное положение, а во втором — в вертикальное путем поворота всего микрометра на 90°.

§ 12. ЭЛЕКТРОМОТОРНЫЙ ПРИВОД ДЛЯ ВРАЩЕНИЯ ТЕОДОЛИТА ПО АЗИМУТУ И ВЫСОТЕ

Для исключения влияния погрешностей, связанных с возможным остаточным наклоном подвижной нити контактного микрометра, необходимо изображение звезды во время наблюдений удерживать внутри неподвижного биссектора микрометра. Так как при наблюдениях зенитальными способами неподвижный биссектор занимает вертикальное положение, то для компенсации влияния азимутальной скорости звезды на зенитном расстоянии z верхнюю часть теодолита необходимо вращать по азимуту со скоростью, равной угловой скорости светила в момент наблюдения

$$\frac{dA}{dt} = \sin \varphi - \cos \varphi \sin A_N \operatorname{ctg} z.$$

При наблюдениях азимутальными способами, когда неподвижный биссектор занимает горизонтальное положение, необходимо компенсировать влияние скорости движения звезды по высоте, равной

$$\frac{dz}{dt} = \cos \varphi \sin A.$$

При наблюдениях с контактным микрометром, когда обе руки наблюдателя заняты вращением рукоятки ручного привода, указанные вращения прибора по азимуту или по высоте осуществ-

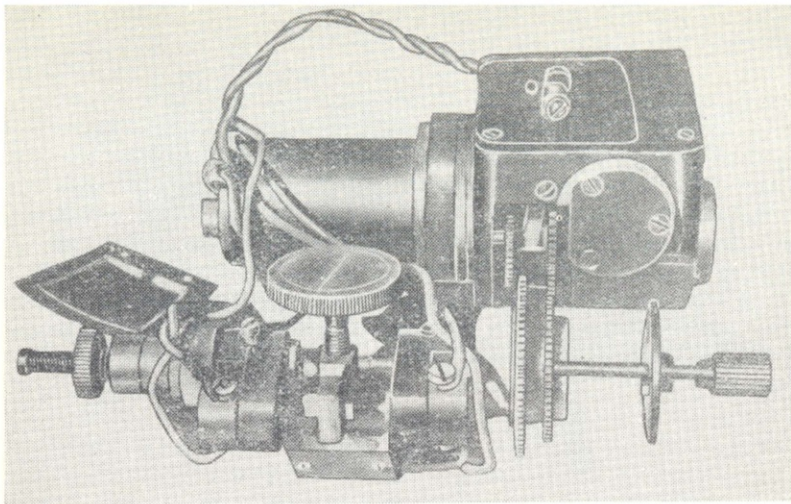


РИС. 29. Общий вид электромоторного привода для вращения теодолита по азимуту

ляются с помощью электромоторного привода. Общий вид электромоторного привода, установленного на подставке трубы АУ2"/10" для вращения прибора по азимуту, показан на рис. 29.

Принципиальная схема электромоторного привода показана на рис. 30.

В качестве двигателя используется малогабаритный электромотор постоянного тока МУ-010 мощностью 3,5 Вт с максимальным числом оборотов 9100 в минуту и максимальным рабочим напряжением 27 В.

Редуктор предназначен для снижения числа оборотов мотора до величины, обеспечивающей вращение наводящего устройства с частотой, соответствующей азимутальной скорости (скорости движения по высоте) наблюдаемых звезд в произвольных азимутах на зенитных расстояниях от 15 до 75°.

Для аналитического выражения этого условия введены следующие обозначения:

R — цена оборота наводящего винта алидады в минутах дуги; v — частота вращения оси мотора, об/мин; v_0 — частота вращения наводящего устройства, об/мин; k — коэффициент редукции.

С принятыми обозначениями будем иметь

$$\frac{dA}{dt} = 15 (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{ctg} z \cos A_N) = Rv_0,$$

откуда

$$v_0 = \frac{15 (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{ctg} z \cos A_N)}{R}.$$

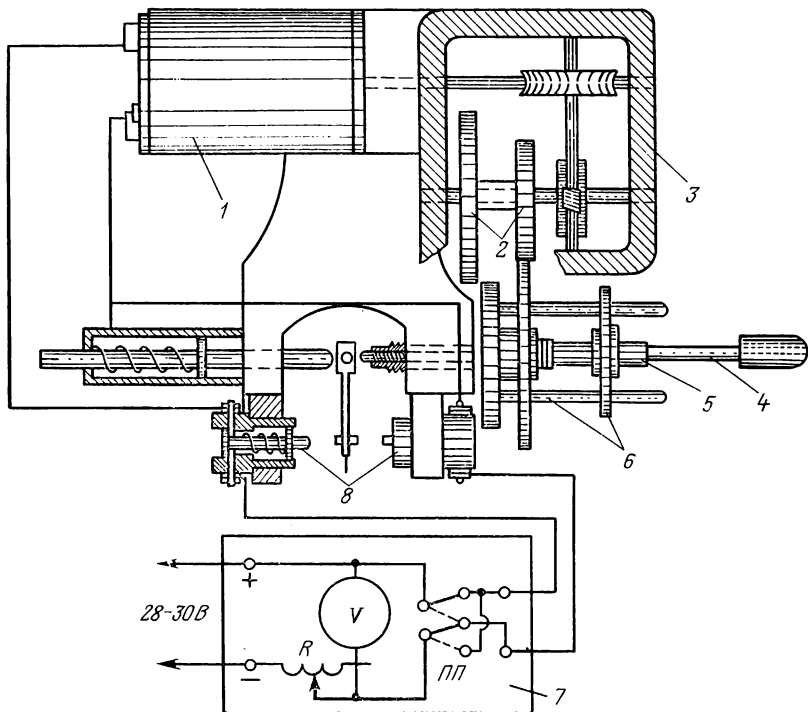


Рис. 30. Принципиальная схема электромоторного привода:

1 — двигатель, 2 — система шестерен (трансмиссия), 3 — редуктор с двумя степенями передач, 4 — наводящего (корректировочного винта), 5 — наводящего устройства, 6 — привод, 7 — пульт управления, 8 — предохранительное устройство

Полагая для теодолита АУ2"/10" $R = 8,5'$, $\varphi = 45^\circ$, $z = 15^\circ$, $A = 180^\circ$, получим максимальное значение частоты вращения наводящего винта $v_0 = 5,5$ об/мин.

Коэффициент редукции найдется из соотношения

$$k = \frac{v}{v_0} = \frac{9100}{5,5} \approx 1650.$$

Необходимая стабильность оборотов, как показывают расчеты, должна быть $\delta v < 0,08$ об/мин. Такая стабильность обеспечивается при питании не только от аккумуляторов, но и от батареи сухих элементов.

В редукторе применена система червячных передач, обеспечивающая большой коэффициент редукции k , малые габариты и достаточную плавность вращения шестерен.

С выхода редуктора через систему шестерен трансмиссии 2 (см. рис. 30) вращательное усилие передается наводящему винту 5. На малых оборотах, при которых мотор работает все же неустой-

чиво, для изменения частоты вращения можно изменить коэффициент редукции путем скачкообразного переключения шестерен трансмиссии.

На месте стандартного наводящего винта устанавливается двойной наводящий винт, который имеет стандартную резьбу по патрону и головку *б* в виде диска с двумя диаметрально противоположными отверстиями. В эти отверстия проходят два пальца цилиндрической опорной шестерни, которая задает вращение наружному наводящему винту. Внутренний наводящий винт-корректор *4* упирается концом в стойку водильца алидады горизонтального круга. Винт-корректор с нарезкой более крупного шага вращается в ведущем наводящем винте от руки и служит для быстрого исправления положения прибора по азимуту независимо от того, работает привод или нет. С помощью винта-корректора подправляется положение изображения звезды относительно нитей неподвижного биссектора перед началом ее регистрации.

Для предохранения наводящего устройства и редуктора от поломок служат контактные электрические ограничители предохранительного устройства *8*. Если при работе привода водильце алидады попадает в крайнее положение, то сработает соответствующий контактный ограничитель, мотор выключится и привод остановится. Пульт управления *7* смонтирован на отдельной выносной панельке. Он состоит из проволочного кольцевого реостата *R* сопротивлением 300 Ом, вольтметра *V* и переключателя *ПП*, являющегося и выключателем. С помощью пульта управления производится регулировка и индикация скорости азимутального вращения прибора, а также изменяется направление вращения. Плавная регулировка частоты вращения осуществляется путем изменения питающего электромотор напряжения с помощью реостата. Нужная частота вращения устанавливается по показаниям индикатора-вольтметра. Направление вращения изменяется путем перемены полярности подаваемого на мотор тока с помощью переключателя *ПП*.

Для уменьшения числа проводов, вращающихся вместе с алидадой теодолита, электрическая цепь от пульта управления к контактам электрических ограничителей проходит через один из проводов освещения и через корпус прибора. При этом подключение электромоторного привода осуществляется общей вилкой электропитания теодолита.

Общая масса конструкции, устанавливаемой на алидаду теодолита, составляет 600 г, что не вносит перегрузок, заметно влияющих на регулировку вертикальной оси теодолита.

Наблюдения способом равных высот и способом Цингера, проведенные в течение многих лет на нескольких теодолитах АУ2"/10" и У5, показали, что электропривод не нарушает устойчивости прибора в целом и положения трубы по высоте. Талькоттовский уровень при наблюдениях с электромоторным приводом успокаивается значительно быстрее, и определение его наклона осуществ-

ляется надежнее, чем при вращении теодолита по азимуту обычным методом. Электромоторный привод легко устанавливается и снимается с теодолита без нарушения целостности его конструкции и деталей.

В настоящее время освоен серийный выпуск электромоторных приводов к теодолиту АУ2"/10". Для наблюдения светил азимутальными способами с помощью контактного микрометра электромоторный привод крепится на подставку трубы теодолита для вращения ее наводящего винта.

Кроме некоторой особенности крепления, никаких переделок при азимутальных наблюдениях светил электромоторный привод не требует.

Результаты азимутальных наблюдений светил с помощью контактного микрометра и электромоторного привода характеризуются высокой точностью.

§ 13. МЕТОД ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОХОЖДЕНИЙ ЗВЕЗД

Применение контактного микрометра для наблюдений моментов прохождений звезд хотя и существенно уменьшает влияние личных погрешностей наблюдателя по сравнению с методом «глаз—ухо», но не может исключить их полностью, так как в таких наблюдениях все еще активно участвуют органы чувств наблюдателя, в частности его глаз. Полное исключение влияния личных погрешностей возможно только при переходе к объективному методу наблюдений прохождений звезд, без активного участия в этом процессе самого наблюдателя.

Создание такого объективного метода регистрации звездных прохождений стало возможным в тридцатых годах нашего столетия на основе достижений физики и радиоэлектроники в области разработки фотоэлементов и усиления слабых токов.

Фотоэлектрический способ регистрации прохождений звезд был разработан профессором Н. Н. Павловым в Пулковской обсерватории АН СССР и впервые применен им в 1937 г. для определения времени с помощью переносного пассажного инструмента.

Фотоэлектрический метод регистрации звездных прохождений основан на замене глаза наблюдателя весьма чувствительным к слабому световому потоку фотоэлементом или фотоумножителем. Перед катодом фотоумножителя в фокальной плоскости объектива трубы вместо сетки нитей устанавливается визирная решетка, состоящая из равноотстоящих узких прямоугольных отверстий, чередующихся с прямоугольными ширмами. Световой поток от звезды, падая на катод фотоумножителя, возбуждает в его цепи слабый фототок. При этом сам световой поток, проходящий через визирную решетку, и возбуждаемый им фототок будут медленно меняться почти по синусоидальному закону, достигая

Величина звезды по яркости	0	2	4	6
Световой поток Φ	$2,9 \cdot 10^{-9}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$7,2 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$

максимума, когда изображение звезды находится в центре отверстия, и минимума, когда изображение звезды находится за непрозрачной ширмой. Фототок усиливается в тысячи раз на каскадах самого фотоумножителя, после чего поступает в специальный усилитель тока, где усиливается до уровня, необходимого для надежной работы регистрирующего устройства. Зная величину светового потока Φ , чувствительность l фотоумножителя и силу тока i , необходимую для срабатывания регистрирующего устройства, можно определить необходимый коэффициент усиления фототока и в соответствии с этим обосновать наиболее целесообразную схему его усиления.

Для астрономического теодолита АУ2"/10" с диаметром объектива $d = 55$ мм величины светового потока в фокальной плоскости звезд различной яркости характеризуются данными (в люменах), приведенными в табл. 1.

Общая чувствительность i современного малогабаритного фотоумножителя ФЭУ-17 равно 20 А на 1 лм.

Для звезд 6-й величины максимальное значение синусоидального фототока в цепи фотоумножителя будет $i_{\phi} = l\Phi = 20 \cdot 1,1 \times 10^{-11} = 2,2 \cdot 10^{-10}$ А.

Если принять, что для срабатывания регистрирующего устройства ондулятора (специального хронографа) требуется сила тока $i_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ А, то при использовании фотоумножителей ФЭУ-17 для фотоэлектрической установки потребуется общее усиление фототока по крайней мере в 10^7 раз. Решение этой сложной технической задачи связано с большими трудностями даже для относительно больших пассажных инструментов в стационарных условиях обсерваторий и служб времени, так как при таких больших усилениях отношение полезного сигнала к шумам сравнительно мало. Эти трудности существенно возрастают для работы в полевых условиях.

Потребовались многие годы кропотливой работы по усовершенствованию фотоэлектрических установок для пассажных инструментов. В этом отношении было много сделано в Службе времени ЦНИИГАиК В. Э. Брандтом. Им была разработана оригинальная схема усиления фототока, позволившая поставить надежные систематические определения поправок часов с помощью пассажного инструмента.

В. Э. Брандт разработал также оригинальную конструкцию фотохронографа, который обеспечивает регистрацию момента на-

блюдений с точностью $0,001^s$. В Пулковской обсерватории АН СССР под руководством профессора Н. Н. Павлова также продолжались работы по совершенствованию фотоэлектрической установки.

В 1957 г. Н. Н. Павлов разработал новую конструкцию фотоэлектрической установки с двумя фотоумножителями и зеркальной визирной решеткой.

Зеркальная решетка представляет собой стеклянную плоскопараллельную пластинку, покрытую алюминиевым слоем. С помощью делительной машины в этом слое вырезаны окна, которые чередуются с зеркальными промежутками. Решетка наклонена к фокальной плоскости объектива на 45° . Если свет от звезды падает на прозрачный участок, то, отразившись, он попадает на катод одного фотоумножителя, если же на зеркальную часть решетки, то после отражения от нее он падает на катод второго фотоумножителя. Включение фотоумножителей рассчитано таким образом, чтобы они работали в противоположных фазах.

Применение фотоэлектрической установки с зеркальной визирной решеткой и с двумя фотоумножителями позволяет компенсировать световой поток от фона неба, более эффективно использовать световой поток от звезды (примерно на 70%), создает возможность при одной и той же настройке усилителя регистрировать прохождение звезд различной яркости, что значительно упрощает регулировку усилителя в процессе наблюдений и повышает точность определений.

**ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
И РЕГИСТРАЦИИ ВРЕМЕНИ.
ПЕРЕДАЧА И ПРИЕМ РАДИОСИГНАЛОВ
ВРЕМЕНИ**

Астрономические определения географических координат и азимута из наблюдений светил, непрерывно меняющих свое видимое положение в пространстве вследствие суточного вращения Земли, производятся в определенной системе счета времени.

Практически эта система осуществляется с помощью специальных приборов измерения времени.

Для точных астрономических определений в стационарных условиях обсерваторий в недавнем прошлом использовались точные маятниковые часы, которые в настоящее время заменены более совершенными кварцевыми и атомными часами.

Для астрономических определений в астрономо-геодезической сети до сих пор еще применяются обычные механические хронометры и лишь в последние годы они стали вытесняться более точными полевыми кварцевыми часами и хронометрами.

Для определения пунктов специального назначения, а также для приближенных астрономических определений, кроме механических хронометров, широкое применение имеют двухстрелочные секундомеры и карманные часы повышенной точности.

Определение поправки часов (т. е. величины, которую нужно придать к показанию часов в некоторый момент, чтобы получить верное время в принятой системе счета) относительно местного среднего или звездного времени производится из наблюдений светил методами и способами, которые будут рассмотрены подробно в последующих разделах учебника.

Определение поправки часов относительно времени начального меридиана, а также определение хода часов (величины, характеризующей изменение поправки часов за единицу времени) в настоящее время обычно производят из приема радиосигналов точного времени, передаваемых радиостанциями по определенной программе.

В данной главе будут кратко рассмотрены приборы измерения и регистрации времени, применяемые для определения пунктов астрономо-геодезической сети и пунктов специального назначения, а также вопросы, связанные с передачей и приемом радиосигналов времени.

Хронометром называется прибор, предназначенный для точного измерения времени. Хронометр, применяемый при астрономических работах, называют столовым, так как для наблюдений он устанавливается на столе или на столбе рядом с наблюдателем. Столовые хронометры, укрепленные на карданном подвесе в специальном ящике, широко используются моряками для астрономического определения местоположения корабля. Поэтому иногда такие хронометры называют также морскими.

Хронометр был изобретен английским часовщиком Гаррисоном в 1734—1768 гг. За истекшие двести лет несколько изменился общий вид этого прибора, изменились качество и технология изготовления отдельных его частей, но принципиальная схема прибора осталась почти без изменений.

Общий вид современного хронометра изображен на рис. 31, часовой механизм на рис. 32. Основными частями хронометра являются: регулятор или маятник, передаточный механизм или спуск, счетчик, двигатель, контактное устройство. Рассмотрим кратко устройство и действие этих частей.

1. Регулятор (маятник)

Регулятором является балансир, качающийся вокруг вертикальной оси OO' под действием балансирной пружины, один конец которой прикреплен к корпусу хронометра, а другой — к оси балансира. Принципиальная схема балансира показана на рис. 33.

Размахи балансира имеют равную продолжительность, и он собственно является измерителем времени; остальной механизм хронометра служит для поддержания колебаний балансира и счета их. Период колебания балансира определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{K}}, \quad (2.1)$$

где I — момент инерции балансира, K — упругая сила пружины балансира.

Момент инерции балансира может быть найден по известной формуле

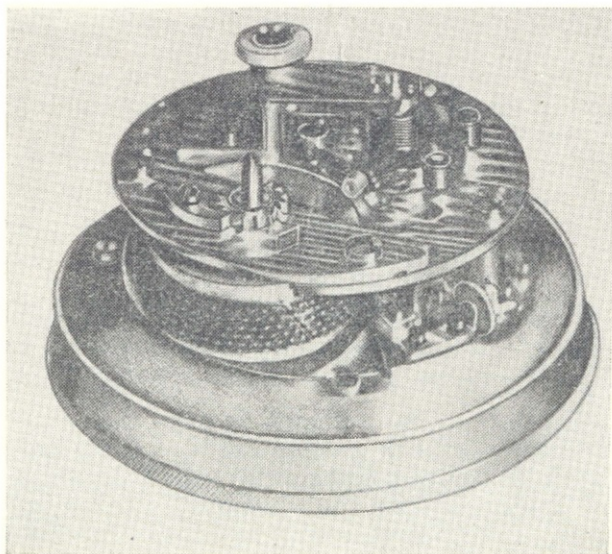
$$I = \frac{Pr^2}{g}, \quad (2.2)$$

где P — масса балансира, r — радиус инерции, g — ускорение силы тяжести.

РИС. 31. Общий вид
морского хронометра



РИС. 32. Механизм
хронометра



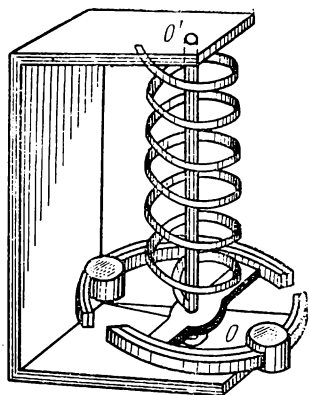


РИС. 33. Принципиальная схема балансира

Упругая сила пружины балансира определяется из выражения

$$K = \frac{El^3d}{12L}, \quad (2.3)$$

где E — модуль упругости материала пружины; d , l и L — соответственно ширина, толщина и длина пружины.

Из формулы (2.1) следует, что теоретически баланси́р изохронен, т. е. период его колебания не зависит от величины амплитуды. Однако специальные исследования показывают, что изохронность баланси́ра нарушается, если он не уравновешен, если концы баланси́рной пружины не имеют идеальной круговой формы, если

ось вращения баланси́ра не вертикальна, так как в этом случае появляется дополнительное трение и поэтому иным образом проявляется действие силы тяжести. Изменения амплитуды колебаний баланси́ра возможны также при увеличении трения, вызываемого износом концевых упоров оси, сгущением масла, резкими толчками, изменением упругой силы заводной пружины и т. п.

Размеры пружины и самого баланси́ра рассчитаны такими, чтобы амплитуда колебаний составляла $300\text{--}400^\circ$, а полупериод колебаний $0,25^s$.

С изменением температуры изменяется большая часть параметров, от которых зависит период колебаний баланси́ра: длина и сила упругости баланси́рной пружины, размеры самого баланси́ра и его момент инерции. По этой причине часы с простым баланси́ром то уходят вперед, то отстают.

Ход хронометра будет независимым от изменения температуры (конечно, в определенных пределах) в том случае, если использовать компенсационный баланси́р, т. е. баланси́р, обладающий автоматической температурной компенсацией.

Автоматическая температурная компенсация основана на том принципе, чтобы при изменении температуры в формуле (2.1) член $\frac{I}{K} = \text{const}$. Указанную задачу весьма удачно решил Гатриссон.

Обод баланси́ра (рис. 34) делается из двух спаянных металлических пластинок, имеющих разные коэффициенты расширения, причем металл с большим коэффициентом расширения находится снаружи, с меньшим — внутри (например, снаружи — медь, внутри — сталь). Обод разрезается в двух диаметрально противоположных местах так, что образуются два полукруга со свободными концами. На обеих половинках обода симметрично распола-

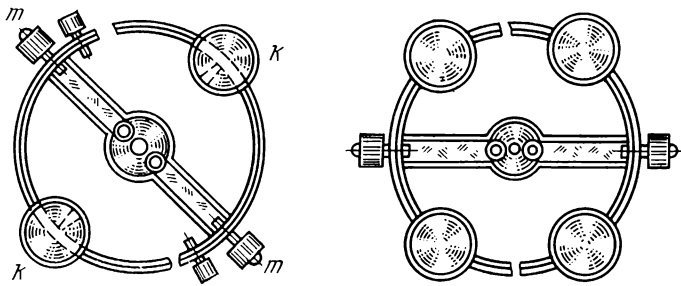


РИС. 34. Балансир

гают по одному или по два грузика k . При повышении температуры наружная часть обода удлиняется больше, чем внутренняя, и так как пластинки между собой спаяны, то свободные концы половинок обода изогнутся внутрь и компенсационные грузики приблизятся к оси балансира, вследствие чего момент инерции балансира

$$I = \frac{Pr^2}{g}$$

будет уменьшен. В таком же отношении уменьшится и момент упругости балансирной пружины K , так как при повышении температуры длина пружины увеличится. При понижении температуры произойдет обратное явление. Перемещая компенсационные грузики k вдоль обода, можно в известных пределах менять производимый ими эффект.

В концы спицы ввинчиваются регулировочные винты m . Если компенсация достигнута, то перемещением этих винтов, не нарушая компенсации, можно регулировать ход хронометра. В современных хронометрах наружное кольцо обода балансира делается из латуни, внутреннее из инвара, а пружина — из эльинвара — сплава никеля, железа и хрома, обладающего почти неизменной упругостью.

Нужно иметь в виду, что температурный компенсатор не устраняет полностью влияния изменения температуры на период колебания балансира. Обычно компенсация достигается для двух значений температуры, например $+5$ и $+35^\circ$ С. При других температурах, особенно при отрицательных, компенсация будет не полной.

2. Спуск (передаточный механизм)

Спуск предназначен для передачи изохронных колебаний регулятора последнему из системы колес счетчика (храповому колесу), движение которого под действием балансира идет скачками. Вместе с тем, назначение спуска — тормозить движение колесного механизма и передавать балансиру импульсы для поддержания его качания. Хронометры имеют конструкцию так называемого

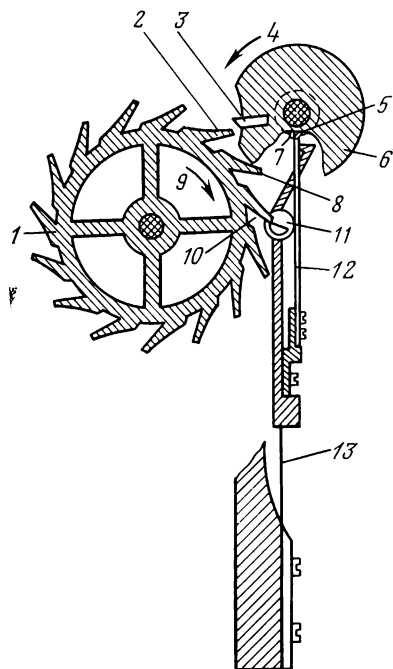


РИС. 35. Принципиальная схема передаточного механизма хронометра

ления с зубом 10 спускового колеса. Под действием двигателя зубчатое колесо повернется по ходу часовой стрелки 9, при этом его зубец ударит по импульсному камню 3 и сообщит балансиру небольшой импульс, достаточный для поддержания его колебательного движения. При дальнейшем движении балансира импульсный камень 3 отойдет от зубца 2 спускового колеса и оно продолжит свое движение до тех пор, пока его зубец 8 не встретится с камнем 11, уже вернувшимся за это время в положение покоя. В момент их встречи слышен удар хронометра. Когда балансир под действием балансирной пружины изменит движение на обратное, то спусковой камень 7 легко отодвинет влево слабую спусковую пружину 12, оставив на месте пружину покоя и зубчатое колесо. При новой перемене направления движения балансира все описанное повторится в той же последовательности. Таким образом, за период колебания балансира спусковое колесо повернется на один зубец, что составляет $0,5^s$.

3. Счетчик

Счетчик представляет собой систему колес, отсчитывающую колебания балансира и фиксирующую их с помощью секундной, минутной и часовой стрелок циферблата.

свободного спуска с «пружинной покое».

Рассмотрим принципиальную схему спуска (рис. 35). Спуск состоит из спускового зубчатого колеса 1 (храпового колеса), пружины покоя 13, спусковой пружины 12 и камня пружины покоя 11. Диск 6 с импульсным камнем 3, диск 5 со спусковым камнем 7 насажены на ось балансира. Храповое колесо 1, камень 11 и импульсный камень 3 лежат в одной плоскости с диском 6, а пружина покоя 13, спусковая пружина 12, спусковой камень 7 и диск 5 — в другой плоскости.

При вращении балансира в направлении, указанном стрелкой 14 (против хода часовой стрелки), спусковой камень 7 давит на конец спусковой пружины 12 и отводит ее, а вместе с ней пружину покоя 13 в правую сторону. При этом камень 11 выходит из зацепления

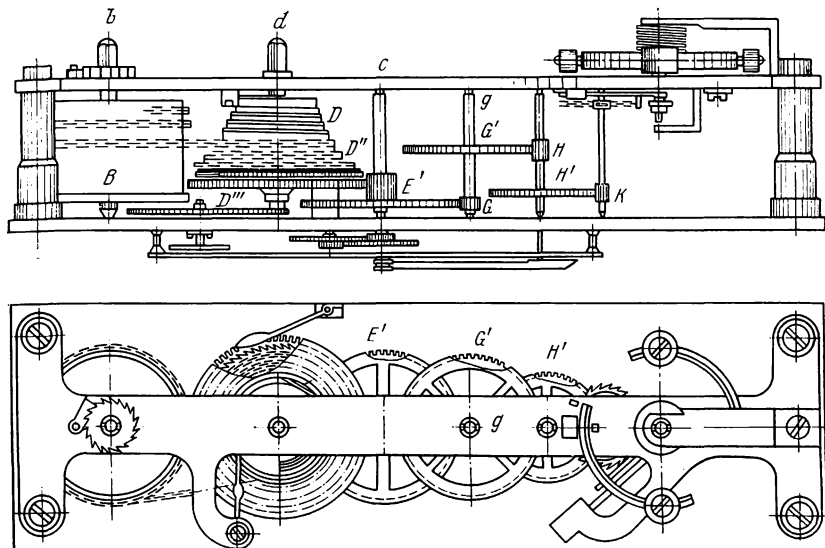


РИС. 36. Принципиальная схема счетчика хронометра

Принципиальная схема счетчика показана на рис. 36.

На оси спускового колеса укреплена шестеренка K , в зацепление с которой входят зубьями секундное колесо H' . На оси секундного колеса насажена шестеренка H , а на конце оси — секундная стрелка. Секундная стрелка передвигается скачкообразно на половину секундного деления шкалы вместе с поворотом спускового колеса на один зубец.

В зацепление с шестеренкой H входит промежуточное колесо G' , на оси которого укреплена шестеренка G . В зацепление с промежуточной шестеренкой G входит минутное колесо E' , на конце оси которого укреплена минутная стрелка.

Коэффициент редукции шестереночной передачи счетчика подобран так, чтобы за время, в течение которого секундная стрелка опишет полный круг (120 периодов колебаний балансира), минутная стрелка передвинулась на $1/60$ часть минутной шкалы, т. е. на одну минуту. Движение минутной стрелки связано системой передачи с движением часовой стрелки. Коэффициент редукции этой системы передачи подобран таким образом, что за период, в течение которого минутная стрелка сделает полную окружность, часовая стрелка передвинется на $1/12$ часть окружности, что равняется одному часу. Полную окружность часовая стрелка делает за 12 ч. Система передачи движения минутной стрелки часовой укреплена на втулке, насаженной на ось минутного колеса на трении. Подобное крепление минутной и часовой стрелок, связанных между собой, позволяет на ходу хронометра переставлять их, вращая ключом втулку минутной стрелки и не перемещая при этом минутного колеса.

4. Двигатель

Двигатель хронометра предназначен преодолевать трение и сопротивление системы колес и поддерживать колебательное движение балансира.

Двигатель хронометра состоит из тонкой стальной пружины, закрученной в спираль, один конец которой прикреплен к неподвижной оси барабана *b* (см. рис. 36), а другой — к его внутренней поверхности *B*.

На наружную поверхность барабана *B* намотана цепочка Галля, которая одним концом укреплена на барабане, а другим на основании конуса улитки *D*, называемой фюзеем. На поверхности конуса фюзей проточен по винтовой линии желобок для цепочки Галля. Фюзей вращается на оси *d*, которая, кроме фюзей, несет первое зубчатое колесо. Это колесо своей зубчаткой входит в зацепление с шестеренкой, насаженной на ось минутного колеса счетчика, и через нее передает усилия двигателя всей системе шестеренчатых передач.

При заводе хронометра ключ вставляют на конец оси *d* фюзей и вращают его против часовой стрелки, при этом цепочка Галля наматывается вначале завода на нижнюю часть фюзей с большими радиусами желоба, а в конце завода — на верхнюю, где желобок имеет значительно меньшие радиусы.

Во избежание остановки хронометра во время завода фюзей снабжается дополнительным колесом с косыми зубьями, в которые заскакивает собачка. С помощью этого приспособления начальное колесо удерживается в покое, и усилия завода не передаются на остальную систему колес, пока вал фюзей поворачивают ключом в обратную сторону.

В процессе хода хронометра цепочка сматывается с фюзей на барабан; при этом наибольшая сила пружины приходится на тот период, когда цепочка намотана на узкую часть фюзей и, следовательно, требуется наибольшая сила для его поворота; по мере того как сила пружины ослабевает, она действует на более широкие части фюзей и потому он вращается все время равномерно, обеспечивая правильность хода хронометра. Идея фюзей, как и компенсационного балансира, также принадлежит Гариссону.

Для приведения в движение механизма заведенного хронометра нужно сообщить ему легкий импульс, чтобы балансир совершил свое первое колебание и освободил при этом спусковое колесо.

5. Контактное устройство

Контактное устройство хронометра предназначено для замыкания и размыкания электрической цепи регистрирующего устройства в моменты, кратные полусекундам хронометра. Принципиальная схема контактного устройства приведена на рис. 37.

Контактное устройство состоит из добавочного контактного колеса *A*, насаженного на ось секундного колеса хронометра, и

контактного рычага \bar{B} , вращающегося на оси c . Контактное колесо имеет 60 косых зубцов, из которых один выпилен. Контактный рычаг на одном конце имеет камень a , входящий между зубцами контактного колеса, а на другом — платиновый контакт b , который может касаться платинового контакта d , укрепленного на юстируемом штифте e .

Спиральная пружина g рычага B стремится постоянно прижимать платиновый контакт b к контакту d .

Ток от батареи подается через корпус хронометра на рычаг B и изолированный от корпуса штифт e .

Во избежание обгорания контактов параллельно им в цепь включается искрогасящее устройство E , состоящее из сопротивления и конденсатора.

Контактное устройство конструируется так, что каждые целые полусекунды камень a должен находиться то на зубе контактного колеса, то между его зубьями. Когда камень a отводится зубом в сторону — цепь размыкается, когда он попадает между зубьями — цепь замыкается. Для счета целых минут секундная стрелка закрепляется на оси секундного колеса так, чтобы началу размыкания длинного контакта с выпиленным зубом соответствовало начало минуты.

Ход хронометра может быть отрегулирован как по звездному, так и по среднему времени. В первом случае хронометр называется звездным, во втором — средним.

6. Правила обращения с хронометром

Хронометр — точный астрономический прибор, от качества которого во многом зависят качество и точность астрономических определений географических координат и азимута направления.

Как и любой точный прибор, хронометр требует тщательного ухода и бережного обращения. При работе с ним следует соблюдать следующие правила.

При переноске следует оберегать хронометр от толчков и резких поворотов, так как при неосторожных движениях балансир может получить такой размах, что спусковое колесо перескочит через один-два зубца и в показаниях хронометра будет потеряна половина или целая секунда. Нужно следить, чтобы циферблат хронометра всегда имел горизонтальное положение.

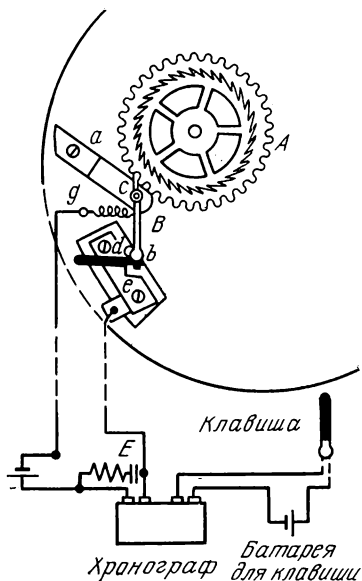


РИС. 37. Принципиальная схема контактного устройства хронометра

Перевозить хронометры нужно в специальных амортизированных ящиках с мягкой обивкой внутри. Необходимо принимать все возможные меры к тому, чтобы при перевозках не было сильных толчков, тряски и ударов. На время переездов останавливать хронометры не рекомендуется.

При работе заводить хронометр нужно ежедневно в один и тот же час. Работа на одних и тех же частях пружины двигателя обеспечивает наибольшее постоянство хода. Без нужды не следует переставлять стрелки, а двигать их против хода категорически воспрещается.

Не следует без нужды обнажать механизм хронометра, так как при этом возможно попадание пыли, что влечет за собой сгущение смазки.

Имея в виду, что компенсация хронометра достигается в пределах температур от 0 до 40° С, следует всячески предохранять его от продолжительного воздействия холода и солнечных лучей. При сгущении смазки под действием холода хронометр вообще может остановиться. Всякое резкое изменение температуры ведет к значительным колебаниям хода.

Для обеспечения длительной работы хронометра следует менять смазку через каждые 2—3 года. Иначе смазка сгущается и стареет, что может отрицательно сказаться на работе хронометра.

§ 15. ПОНЯТИЕ О КВАРЦЕВЫХ ЧАСАХ. ПОЛЕВОЙ КВАРЦЕВЫЙ ХРОНОМЕТР ПКХ-4

В конце прошлого столетия был открыт пьезоэлектрический эффект некоторых кристаллов, например кварца, сегнетовой соли и др.

Сущность этого эффекта состоит в том, что при сжатии или растяжении кристаллов в определенных направлениях на их гранях возникают электрические заряды. И, наоборот, если кристалл поместить в переменное электрическое поле, то под действием этого поля он начинает сжиматься и разжиматься, т. е. совершать упругие колебания в определенных направлениях.

Исследованиями установлено, что амплитуда упругих колебаний пластинки или кольца кварца достигает наибольшего значения при резонансе, т. е. при равенстве частоты электрического поля и частоты собственных колебаний кварца. При определенных условиях частота таких колебаний отличается высокой стабильностью.

Указанные свойства пьезоэлектрического эффекта кристаллов находят широкое применение в различных областях техники. В 1929 г. пьезоэлектрический эффект кварца впервые был использован для изготовления часов, получивших название кварцевых. Роль маятника в этих часах играет пластинка из кристалла кварца, помещенная в электрическое поле. В кварцевых часах применяются высокочастотные кварцевые элементы с частотой до 10^6 —

10^7 периодов в секунду, обладающие малым декрементом затухания. Возникающими колебаниями кварца устанавливается частота генератора переменного тока, который питает специальный синхронный мотор, приводящий в действие часовой механизм.

Энергия тока высокой частоты, возникающего в генераторе, мала и не может непосредственно привести в действие синхронный мотор, поэтому частота тока предварительно понижается с помощью делителей частоты, а затем ток усиливается в специальных усилителях и подается на мотор. В кварцевых часах применяют несколько каскадов деления частоты, каждый из которых обеспечивает работу различных частей схемы. В некоторых схемах кварцевых часов для измерений интервалов времени частота колебаний понижается до 1—2 периодов. Ток с частотой 1—2 Гц, предварительно усиленный, приводит в движение стрелочный механизм. При этом секундные контакты снимаются с электронного реле. Для обеспечения необходимой стабилизированной частоты кварц и некоторые элементы колебательного контура термостатируют, а также принимают надежные меры стабилизации питающих напряжений.

Исследования, произведенные за последние десятилетия, показывают, что кварцевые часы обладают большими преимуществами перед лучшими маятниковыми часами в смысле постоянства их хода. Среднее суточное колебание хода кварцевых часов выражается несколькими десятитысячными долями секунды. С помощью кварцевых часов удалось установить и изучить неравномерность вращения Земли. Преимуществом кварцевых часов следует также считать их полную независимость от явлений сейсмического и гравитационного характера.

Электронная схема современных кварцевых часов довольно сложная и поэтому надежность их непрерывной работы в течение длительных промежутков времени, измеряемых годами, пока еще уступает надежности обычных маятниковых часов. Поэтому в обсерваториях и службах времени применяют блоки из нескольких кварцевых часов. Случайная остановка одних часов такого блока не оказывает заметного влияния на среднее из показаний остальных часов.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом разработаны образцы малогабаритных кварцевых часов на транзисторах, предназначенных для астрономических определений пунктов в полевых условиях. Такие кварцевые часы принято называть кварцевыми хронометрами. Инструкция по развитию государственной геодезической сети 1966 г. рекомендует в качестве основного прибора измерения времени при определении астрономических пунктов полевой кварцевый хронометр, разработанный в ЦНИИГАиК П. С. Поповым¹.

¹ Описание заимствовано из краткого описания и инструкции по эксплуатации ПКХ-4, прилагаемых к прибору.

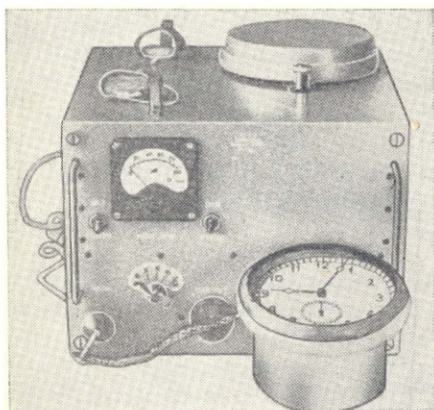
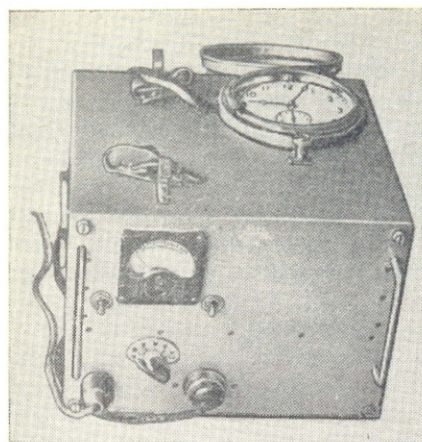


РИС. 38. Полевой кварцевый хронометр ПКХ-4

Полевой кварцевый хронометр ПКХ-4. Хронометр представляет собой переносные кварцевые часы с экономичным питанием и предназначается для астрономических определений широт, долгот и азимутов на пунктах астрономо-геодезической сети. ПКХ-4 имеет часовой механизм, дающий показания в часах, минутах и секундах, снабженный секундным контактом с минутной маркой для регистрации показаний хронометра на ленте хронографа. Ход ПКХ-4 отрегулирован по звездному времени. Общий вид полевого кварцевого хронометра ПКХ-4 показан на рис. 38, а принципиальная схема прибора — на рис. 39.

Основными частями прибора являются:

кварцевый генератор в терморе с частотой 100 274 Гц, что соответствует 100 000 периодам в звездную секунду, преобразователь формы сигналов генератора,

делитель частоты со 100 000 до 2 периодов в звездную секунду,

электронное реле привода часового механизма, шаговый часовой механизм,

внутренняя батарея резервного питания из сухих элементов, измерительный прибор с переключателем для контроля напряжений источников питания и работы генератора.

Кварцевый генератор состоит из кварца Q с частотой 100 274 Гц, включенного в бесконтурную схему емкостной трехточки на кремниевом триоде $ПП1$, и имеет подстроечный конденсатор $СЗ$ для точной установки хода. От дальнейшей электронной схемы генератор развязан при помощи двух буферных усилителей с дроссельной нагрузкой на аналогичных триодах $ПП2$ и $ППЗ$ по схеме с общим эмиттером.

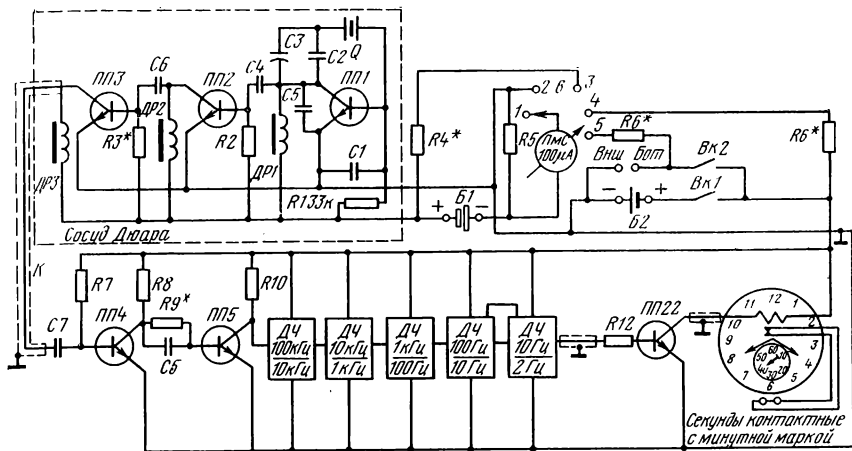


РИС. 39. Принципиальная схема кварцевого хронометра ПКХ-4

Кварцевый генератор вместе с буферными усилителями заключен в сосуд Дюара, установленный вертикально на амортизированной панели. Сосуд Дюара в нижней части герметизирован резиновой пробкой, а сверху закрыт цилиндрическим алюминиевым экраном, покрытым изнутри поролоном для дополнительной теплоизоляции и амортизации.

Преобразователь формы сигналов предназначен для преобразования колебаний кварцевого генератора, близких с синусоидальным, в сигналы с крутым фронтом, необходимые для управления триггерной схемой деления частоты. Для этой цели применен мультивибратор с одним устойчивым состоянием на двух кремниевых триодах ПП4 и ПП5.

Делители частоты предназначены для преобразования частоты кварцевого генератора со 100 000 периодов в звездную секунду до двух периодов в звездную секунду. Деление осуществляется в пяти блоках при помощи триггерных ячеек двоичного счета на кремниевых триодах.

В каждом из первых четырех блоков, состоящих из четырех триггерных ячеек с двумя цепями обратной связи, обеспечивается коэффициент деления, равный 10.

Первые три ячейки пятого блока с двумя цепями обратной связи обеспечивают коэффициент деления, равный 5. Последняя ячейка пятого блока, представляющая собой триггер с двухсторонним управлением, преобразует выходные полусекундные сигналы в импульсы с длительностью 50 мс с частотой 2 импульса в звездную секунду. Это достигается за счет подачи на второй вход этого триггера частоты 20 периодов в звездную секунду со сдвигом фазы на 180° с предпоследней ячейки предыдущего блока деления частоты. Все делители частоты собраны на кремниевых триодах,

работающих в режиме насыщения для повышения помехоустойчивости.

Электронное реле предназначено для возбуждения электромагнитного шагового часового механизма. Реле выполнено на германиевом триоде ПП22. Оно возбуждается в свою очередь полусекундными импульсами длительностью 50 мс от последнего делителя частоты.

Шаговый часовой механизм предназначен для счета полусекундных импульсов, получаемых с выхода электронного реле. Он выполнен из деталей часов НЧ-2 и снабжен электромагнитным поляризованным шаговым устройством и секундным контактом.

На оси секундной стрелки установлено контактное колесо точно такого же вида, как в обычном хронометре. Оно имеет 60 зубцов, из которых один вырезан и представляет собой минутную марку. Контактный рычаг, один конец которого скользит по контактному колесу, а другой имеет платиновый контакт, размыкает цепь регистрирующего устройства на $0,5^s$ каждую секунду, за исключением шестидесятой секунды каждой минуты.

Циферблат часового механизма аналогичен циферблату обычного хронометра. Он разделен на 12 ч, 60 м и 120 полусекунд. Шаг секундной стрелки — полусекундный.

Цель секундного контакта часового механизма выведена шнуром, заканчивающимся стандартной вилкой для включения в клеммы хронографа.

С электронной частью схемы часовой механизм соединяется экранированным шнуром специальной трехконтактной вилкой.

С помощью контактного устройства часового механизма можно принимать радиосигналы времени полуавтоматическим и автоматическим способом, а также производить автоматическую запись показаний хронометра на ленте хронографа при наблюдениях звезд.

Питание кварцевого генератора хронометра осуществляется от одного сухого элемента типа 1,66-ТМЦ-У28 емкостью 30 А·ч, установленного внутри прибора и обеспечивающего работу генератора без выключения примерно в течение года.

Питание остальной части электронной схемы может осуществляться как от внутренней батареи из 10 сухих элементов типа 1,6-ПМЦ-У8 емкостью 8 А·ч и напряжением 12—16 В, так и от внешнего источника постоянного тока такого же напряжения. В качестве таких источников тока могут быть использованы аккумуляторы, сухие элементы или выпрямитель сетевого напряжения. Общая потребляемая мощность менее 1 Вт.

Контроль напряжения источников питания и работы генератора осуществляется с помощью измерительного прибора ПМС с переключателем.

Полевой кварцевый хронометр ПКХ-4 может работать в пределах окружающей температуры от -20 до $+50^{\circ}$ С. Средняя ква-

дратическая вариация суточного хода при изменении внешней температуры со скоростью до 1°C в час составляет около $0,2^{\text{s}}$, а средняя квадратическая вариация двухчасового хода в тех же условиях — не более $0,02^{\text{s}}$. Температурная зависимость хода ПКХ-4, зависящая от температурного коэффициента примененного кварца, значительно меньше в области положительных температур, чем отрицательных. В связи с этим не следует держать электронную часть прибора длительное время при низких температурах.

При условии регулирования режима термостатирования вариация суточного хода кварцевого хронометра не превышает $0,015^{\text{s}}$, а средняя квадратическая вариация двухчасового хода $0,003^{\text{s}}$. Масса прибора с внутренним источником питания около 10 кг.

§ 16. ЭКСПЕДИЦИОННЫЙ КВАРЦЕВЫЙ ХРОНОМЕТР «АЛЬТАИР»

Экспедиционный кварцевый хронометр «Альтаир» предназначен для воспроизведения системы координированного времени. Хронометр обеспечивает:

- хранение координированного времени,
- выдачу на внешние разъемы сигналов времени и частоты,
- управление регистрирующими устройствами МПУ8-3 и ХПМ-3¹,
- автоматическое и ручное фазирование показаний хронометра по радиосигналам времени,
- определение поправки к показаниям хронометра относительно сигналов времени.

Хронометр после 8-часового прогрева имеет среднюю квадратическую вариацию суточного хода менее 1 мс. Общий вид хронометра с открытой крышкой панели управления показан на рис. 40. Функциональная схема прибора изображена на рис. 41.

Пределы коррекции частоты опорного генератора хронометра не менее $7 \cdot 10^{-7}$ или хода хронометра $0,06$ с/сутки. Разрешающая способность установки частоты опорного генератора относительно частоты рабочего эталона $1 \cdot 10^{-9}$ или хода хронометра $0,1$ мс/сутки.

Показания хронометра с дискретностью 1 с выдаются на стрелочный циферблат и цифровое светящееся табло.

На внешние разъемы выдаются сигналы:

- синусоидальной формы, частотой 5 МГц, 100 и 1 кГц с уровнем выходных напряжений $0,25$ В на активной нагрузке 150 Ом;

- прямоугольной формы, отрицательной полярности с периодами $0,1$ с, 1 с, $n1$ с маркированные на каждой минуте, с амплитудой выходных напряжений $1,5$ В на активной нагрузке 150 Ом; длительность сигналов: $0,1$ — $0,02$ с, 1 с — 100 мс, маркирующего сигнала — $0,5$ с;

¹ Краткое описание регистрирующих устройств МПУ8-3 и ХПМ-3 будет дано ниже.

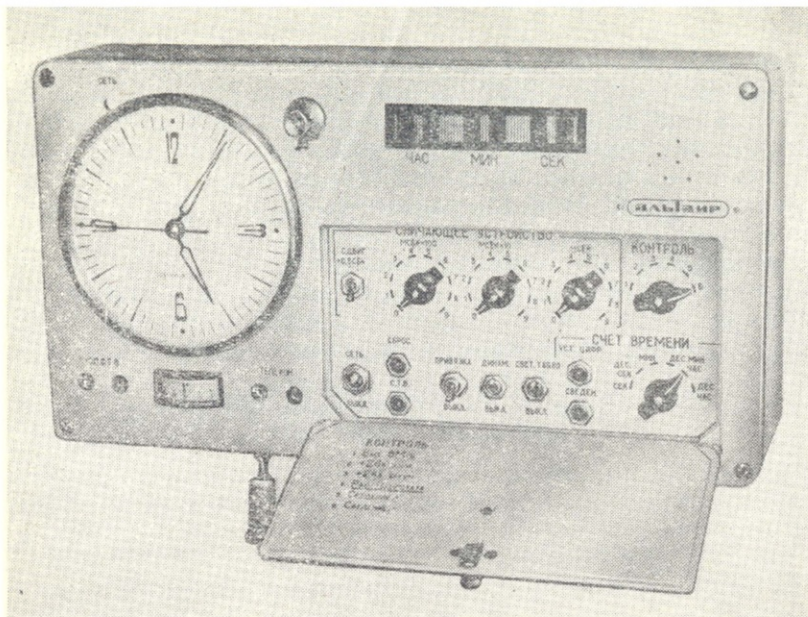


РИС. 40. Экспедиционный кварцевый хронометр «Альтаир»

меандровой формы с периодом 1 с, маркированные на каждом начале минуты импульсом 1,5 с, предназначенные для обеспечения работы хронографа ХПМ-3;

прямоугольные кодовые, положительной полярности, по четырем каналам для каждого из девяти разрядов (от 1 мс до 1 суток) с периодом следования 1 мс и перепадом напряжения от 0,4 до 2,4 В для работы МПУ8-3;

меандровой формы с частотой следования 10 кГц напряжением 3 В для синхронизации записи кодовой информации в блок памяти МПУ8-3.

Автоматическая синхронизация показаний хронометра с определенностью 1 с по внешним секундным сигналам идеальной формы выполняется с погрешностью 0,5 периода частоты 100 кГц, т. е. 5 мкс; при подаче на хронометр сигналов времени с радиоприемника средняя квадратическая погрешность фазирования может превышать указанную величину. При неблагоприятных условиях приема автоматическое фазирование вообще невозможно.

Ручная синхронизация показаний хронометра по радиосигналам точного времени с определенностью 1 с в зависимости от качества сигналов и метода индикации характеризуется средней квадратической ошибкой от 0,1 до 1 мс.

Определение поправки к показаниям хронометра относительно радиосигналов времени, выполняемое методом слуховой индика-

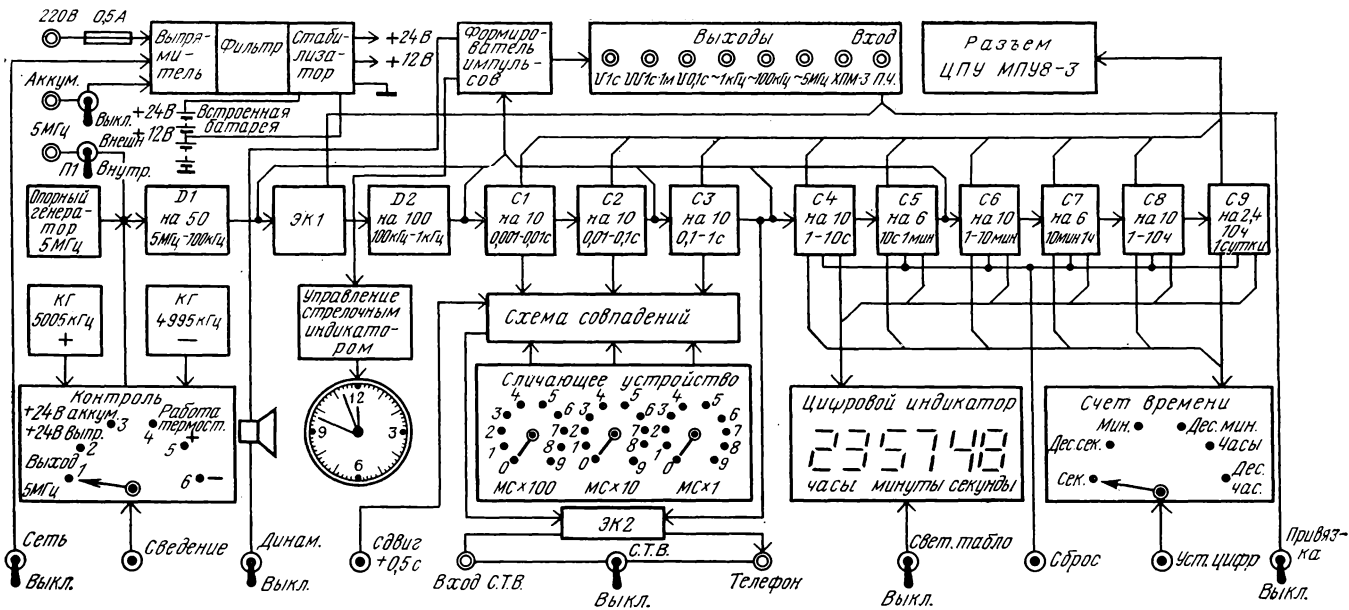


РИС. 41. Функциональная схема кварцевого хронометра «Альтаир»

ции, с определенностью до 1 с, возможно со средней квадратической погрешностью 1 мс.

Питание хронометра предусмотрено от:

сети переменного тока 220 ± 22 В, 50 Гц;

внешнего источника постоянного тока напряжением $24 \pm \pm 2,4$ В с отводом $+ 12$ В;

встроенной батареи из 16 элементов «Марс» (373), батарея обеспечивает только хранение времени в течение 24 ч.

Мощность, потребляемая хронометром при питании от внешнего источника постоянного тока, не более 6 Вт, а при питании от встроенной батареи — не более 2,5 Вт.

Масса хронометра с встроенным источником питания в футляре не превышает 13 кг. Габаритные размеры: $362 \times 250 \times 220$ мм.

В хронометре в качестве источника высокостабильных колебаний использован кварцевый генератор с частотой 5 МГц. Частота генератора подстраивается к номинальному значению с помощью многооборотного потенциометра, ось которого выведена через отверстие в верхней плоскости футляра.

На вход делителя частоты с 5 МГц до 100 кГц $D1$ (см. рис. 41) через переключатель $П1$ в положении «Внутр» с генератора подается напряжение частоты 5 МГц. В положении «Внешн» через разъем 5 МГц на вход делителя $D1$ может быть подано напряжение частоты 5 МГц от внешнего стабильного генератора.

Сигналы с частотой следования 100 кГц через электронный ключ $ЭК1$ поступают на вход делителя частоты $D2$ со 100 кГц до 1 кГц и далее на цепочку из девяти счетчиков $C1—C9$, вырабатывающих сигналы, кратные: 0,001, 0,01, 0,1 и 1 с; 10 с; 1 и 10 мин; 1, 10 и 24 ч.

Десятиразрядный счетчик $C1—C9$ осуществляет счет поступающих на его вход импульсов путем преобразования последовательности импульсов в двоично-десятичный код. Информация о текущем времени в двоично-десятичном коде после двойного декодирования сначала в десятичный, а затем в «семиэлементный» код со счетчиков $C4—C9$ поступает через электронные ключи на электроды семиэлементных цифровых индикаторов в часах, минутах и секундах.

Для управления цифрорпечатающим устройством МПУ8-3 по четырем каналам с каждого из счетчиков $C1—C9$ информация о текущем времени в виде сигналов двоично-десятичного кода в системе МТК поступает на внешний разъем МПУ8-3.

Фазирование показаний цифрового индикатора в разрядах десятков часов, часов, десятков минут, минут и десятков секунд достигается подачей на вход соответствующего счетчика $C5—C9$ дополнительных сигналов с периодом следования 1 с. Переключатель «Счет времени» устанавливается на разряд, показания которого предполагается изменить, и нажимается кнопка «Уст. цифр». Каждый секундный сигнал изменяет показание разряда на один; по достижении требуемого показания кнопку отпускают. Для

установки требуемого показания в разряде секунд переключатель «Счет времени» ставится в положение «сек» и нажимается кнопка «Уст. цифр». Кнопка отпускается, когда текущий счет секунд совпадает с показанием секундного разряда. Кнопка «Сброс» позволяет установить показания цифрового индикатора на нулевые значения. Для экономии расходования энергии предусмотрено включение и выключение цифрового индикатора тумблером «Свет. табло»; при этом не нарушается непрерывность индикации времени.

Показания цифрового индикатора всегда совпадает — в часах, минутах и секундах — с кодовой информацией текущего времени, выдаваемой на разъем МПУ8-3. Поэтому фазирование показаний цифрового индикатора сопровождается аналогичным фазированием кодовой информации для работы МПУ8-3.

Сигналы с периодом следования 1 с с выхода счетчика СЗ через формирователь импульсов подаются на схему управления стрелочным индикатором, вырабатывающую меандровые сигналы с периодом следования 2 с, которые приводят в действие анкерный механизм секундной стрелки циферблата. Стрелка перемещается на одно секундное деление в момент изменения полярности меандрового сигнала. Для изменения показаний стрелочного индикатора (перевода стрелок) справа от циферблата вмонтирован механический привод стрелок.

Для определения поправки хронометра относительно сигналов времени в схему хронометра введено сличающее устройство с индикацией сигналов на слух. Поправка хронометра индицируется с дискретностью 1 мс и определенностью до 1 с. В схему сличающего устройства входят: счетчики С1—С3, схема совпадений, индикаторы — переключатели МС×100, МС×10 и МС×1, гнезда для подачи на хронометр с радиоприемника сигналов точного времени «Вход С. Т. В.», гнезда для подключения телефона «Телефон», тумблер «С. Т. В.» для прямой коммутации гнезд «Телефон» и «С. Т. В.» и тумблер «Сдвиг» + 0,5 с, для смещения секундного сигнала и системы индикации хронометра на 0,5 с.

Со счетчиков С1—С3 после декодирования из двоично-десятичного кода в последовательный десятичный импульсы длительностью 1 мс поступают в схему совпадений. Три переключателя МС×100, МС×10 и МС×1 позволяют подавать на входы схемы совпадений любую комбинацию сотен, десятков и единиц миллисекунд. На выходе схемы совпадений образуются импульсы с периодом повторения 1 с и длительностью 1 мс. Положение этих импульсов внутри секундного интервала определяется положением переключателей. На электронный ключ ЭК2 подаются управляющие сигналы: открывающий — с выхода счетчика С3 и закрывающий — с выхода схемы совпадений. Таким образом, период открытого состояния счетчика, отсчитываемый от начала секундного импульса хронометра, определяется состояниями переключателей. Так, например, если клювик МС×100 указывает на 8, МС×10 —

на 5 и $МС \times 1$ — на 3, то в течение 853 мс от начала каждой секунды ключ открыт и пропускает сигналы времени с гнезд «С. Т. В.» на телефонные гнезда «Телефон».

Задачей оператора при определении поправки хронометра относительно сигналов точного времени является определение таких положений переключателей $МС \times 100$, $МС \times 10$ и $МС \times 1$, при которых сигнал, сначала частично слышимый, при уменьшении показания $МС \times 1$ на единицу исчезает.

Тумблер «Сдвиг + 0,5 с» включается в тех случаях, когда сигнал времени располагается одновременно в двух смежных секундных интервалах хронометра. Тумблер «С. Т. В.» ставится в положение выключено, когда производится настройка радиоприемника на частоту радиостанции, передающей сигналы времени.

Автоматическая синхронизация показаний хронометра с определенностью 1 с производится по входу делителя частоты $D2$ со 100 кГц до 1 Гц. Сигналы времени с выхода усилителя промежуточной частоты радиоприемника через разъем «Вход П. Ч.» хронометра после преобразования в сигналы прямоугольной формы поступают на электронный ключ $ЭК1$. При включении тумблера «Привязка» электронный ключ $ЭК1$ запирается и отпирается передним фронтом преобразованного сигнала времени. Через 1 с с выхода делителя $C3$ в схему поступает секундный сигнал хронометра. Если секундный сигнал хронометра совпадает по фазе в пределах 10 мкс с последующим сигналом времени, то схема автоматического фазирования отключается — хронометр сфазирован. Если делитель $D2$ был запущен от помехи, то будет иметь место значительная разность фаз сигналов и цикл автоматического фазирования повторится. Таким образом, в случае должного запуска делителя схема автоматического фазирования сама обнаруживает погрешность и устанавливается в исходное состояние готовности к запуску.

Результат автоматической синхронизации рекомендуется проверять посредством отличающего устройства. При условии правильного фазирования поправка хронометра, как правило, лежит в пределах от 999 до 0,000, что объясняется физиологией слуха оператора.

Ручная синхронизация показания хронометра по радиосигналам времени применяется в том случае, когда условия приема радиосигналов не позволяют воспользоваться системой автоматической синхронизации. Схема ручной синхронизации включает: вспомогательные кварцевые генераторы с частотами 5005 кГц (КГ 5005 кГц) и 4995 кГц (КГ 4995 кГц), переключатель генераторов «Контроль» и кнопку «Сведение», при нажатии которой напряжение одного из вспомогательных генераторов подается на вход делителя частоты $D1$. Относительная разность частот опорного генератора и вспомогательных генераторов $\frac{\Delta f}{f} = 0,001$,

что эквивалентно изменению показаний хронометра на 1 мс за 1 с. Если показания хронометра меньше действительного значения на n миллисекунд, то переключатель «Контроль» устанавливают в положение 5 (+) и держат кнопку «Сведение» в нажатом состоянии n секунд, если показания хронометра больше действительного значения, то переключатель устанавливают в положение 6 (—).

Процесс ручной синхронизации складывается из следующих операций. Прослушивая через телефоны сигналы времени, в момент появления сигнала тумблером «Аккум» или «Сеть» включают хронометр; этим достигается синхронизация показаний хронометра с погрешностью не более 0,05 с. Используя сличающее устройство, определяют поправку хронометра и с помощью системы ручного фазирования исправляют показания хронометра. Последние две операции повторяют до тех пор (обычно 2—3 раза), пока поправка хронометра не будет равна 0.

Фазирование разрядов единиц и десятков секунд цифрового индикатора производится с помощью системы «Счет времени» при одновременном счете сигналов точного времени от начала минуты. Для фазирования показаний хронометра в разрядах минут и часов необходимо знать программное время передачи сигналов.

Оперативный контроль работы хронометра включает:

прослушивание секундных сигналов, модулированных частотой 1000 Гц, через встроенный динамик, который может быть отключен тумблером «Динам.»;

проверку по стрелочному индикатору наличия на входе делителя частоты $D1$ сигнала с частотой 5 МГц (переключатель «Контроль», положение 1);

проверку по стрелочному индикатору наличия на выходе стабилизатора напряжения 24 В (переключатель «Контроль», положение 2);

проверку по стрелочному индикатору наличия на разъеме «Аккум» напряжения 24 В (переключатель «Контроль», положение 3);

проверку работы термостата опорного генератора (переключатель «Контроль», положение 4).

Включение питания по переменному и постоянному току производится независимо тумблерами «Сеть» и «Аккум». Встроенная батарея 24 В включается отдельным тумблером на задней панели хронометра. Независимо от положения этого тумблера при наличии напряжения одного из внешних источников питания встроенная батарея отключается.

Синусоидальные и прямоугольные сигналы с выходов делителей и счетчиков после формирования через электронные повторители выведены на коаксиальные разъемы.

§ 17. ДВУХСТРЕЛОЧНЫЙ СЕКУНДОМЕР И ПАЛУБНЫЕ ЧАСЫ

При определении географических координат и азимута направления на пунктах специального назначения, а также для приближенных астрономических определений вместо хронометра можно применять двухстрелочный секундомер 51СД или морские палубные часы ЧП.

Д в у х с т р е л о ч н ы й с е к у н д о м е р 51 СД представляет собой часовой механизм со свободным анкерным ходом. Общий вид секундомера 51 СД показан на рис. 42.

Циферблат секундомера имеет две шкалы: внешнюю — секундную и внутреннюю — минутную.

Секундная шкала разделена на тридцать больших секундных делений, каждое из которых разделено на 10 малых. Цена малого деления шкалы равна $0,1^s$. Минутная шкала также разделена на 30 больших минутных делений. Цена малого деления минутной шкалы равна $0,5^m$. Секундомер имеет три стрелки: минутную и две секундные — основную (черную) и вспомогательную (красную). Секундные стрелки перемещаются скачкообразно с шагом $0,1^s$ и делают один полный оборот за 30 с. За это же время минутная стрелка перемещается плавно на одно малое деление минутной шкалы (на половину минутного деления).

Если минутная стрелка в пределах каждого большого деления минутной шкалы не дошла до середины, то показания секундной стрелки соответствуют оцифровке секундной шкалы. Если же минутная стрелка перешла за середину минутного деления, то к показаниям секундной стрелки, снятым с циферблата, необходимо прибавить 30 с. Поскольку минутная стрелка делает один полный оборот за 30 мин, то для счета целых часов и получасов необходимо пользоваться обычными наручными часами. Показания минутной стрелки секундомера в этом случае согласуются с показаниями минутной стрелки часов.

На корпусе секундомера расположены заводная головка 2, возвратная кнопка 1 и стопорная кнопка вспомогательной секундной стрелки 3.

Завод секундомера осуществляется вращением заводной головки так же, как и при заводе обычных часов. Первый нажим на заводную головку означает пуск часового механизма секундомера, при котором все три стрелки начинают одновременно двигаться. При этом основная и вспомогательная секундные стрелки движутся совмещенными, одна над другой.

Второй нажим на заводную головку останавливает работу часового механизма; при этом все три стрелки останавливаются. Третий нажим на заводную головку соответствует первому, но все стрелки начинают движение с места предыдущей остановки.

Нажим на возвратную кнопку можно производить только после остановки часового механизма и всех его стрелок. Этот нажим

возвращает все три стрелки в нулевое положение, соответствующее числу 30 на обеих шкалах.

Нажим на стопорную кнопку секундной стрелки 3 производится при необходимости фиксации показаний секундомера без остановки хода часового механизма. При этом нажмем вспомогательная секундная стрелка застопоривается и по ней можно зафиксировать показание секундомера до $0,1^s$, а минутная и основная секундная стрелки продолжают свое движение. После отсчета по секундомеру вторичным нажатием стопорной кнопки вспомогательная секундная стрелка скачком совмещается с основной секундной стрелкой и продолжает вместе с ней движение и счет времени.

При астрономических определениях после завода и пуска часового механизма секундомера пользуются, как правило, только стопорной кнопкой. С помощью двухстрелочного секундомера, пользуясь стопорной кнопкой, можно производить с высокой точностью прием радиосигналов времени, а также наблюдать моменты прохождения звезд через постоянные нити сетки трубы прибора. Для этого достаточно нажать стопорную кнопку под счет любого радиосигнала времени, а при наблюдениях звезд — в момент пересечения звездной нити зрительной трубы и произвести отсчет по шкалам секундомера.

Методика приема радиосигналов времени и наблюдений звезд с помощью двухстрелочного секундомера будет подробно рассмотрена в разделе IV.

Продолжительность хода секундомера от одной полной заправки пружины его двигателя не менее 6 ч. Завод секундомера рекомендуется производить за 40—60 мин до начала работ.

По истечении 3-4 ч работы необходимо подзаводить секундомер.

Ход секундомера отрегулирован по среднему времени. Для астрономических определений долготы и азимута на пунктах специального назначения можно использовать секундомеры с вариацией часового хода, не превышающей $0,5^s$.

П а л у б н ы е ч а с ы (ЧП) (рис. 43) представляют собой карманные часы повышенной точности с анкерным ходом. Балан-

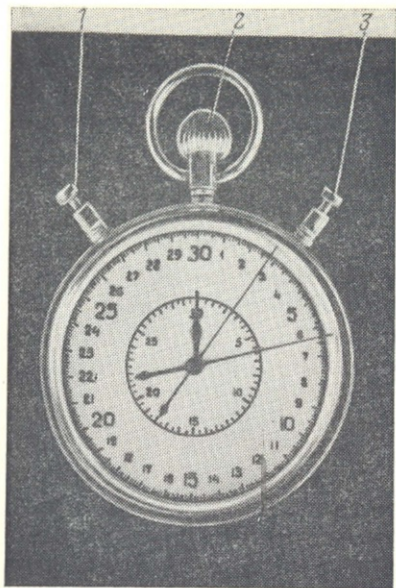


РИС 42. Двухстрелочный секундомер 51СД

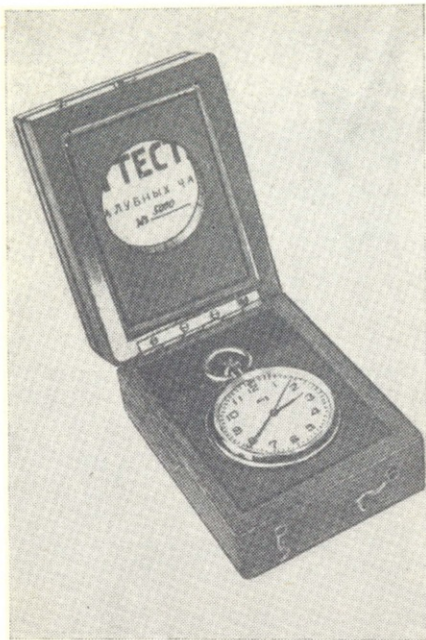


РИС 43. Палубные часы

сир палубных часов компенсационный. Часы отрегулированы по среднему времени. Вариация часового хода не превышает $0,5-0,7^s$. Полный завод пружины обеспечивает работу механизма в течение 40 ч.

Часы имеют три стрелки: часовую, минутную и секундную — центральную. Шкала циферблата — одна. Она разделена на 12 часовых и 60 минутных делений. Каждому часовому делению соответствует пять минутных делений. Минутная шкала является в то же время и секундной. Для отсчета десятых долей секунды деление разделено на пять частей, каждое из которых составляет $0,2^s$. Точность отсчета по шкале секундной стрелки составляет одно-два малых деления.

Для приема радиосигналов времени и наблюдений прохождений звезд палубные часы менее удобны, чем двухстрелочный секундомер. В частности, наблюдения прохождений звезд с палубными часами вынужденно производятся по весьма несовершенной методике, при которой наблюдатель, смотря в трубу, подает команду (обычно словом «есть») в момент пересечения изображением звезды неподвижной нити сетки; по этой команде помощник наблюдателя замечает положение секундной стрелки и производит отсчет по шкале. Для такого метода характерны большие случайные и систематические погрешности, и поэтому для более или менее точных астрономических определений он непригоден.

§ 18. ПОПРАВКА И ХОД ХРОНОМЕТРА (ЧАСОВ, СЕКУНДОМЕРА). ПЕРЕДАЧА ПОПРАВКИ ЗА ДРУГИЕ МОМЕНТЫ.

Поправкой хронометра называется величина u , которую нужно прибавить к показанию хронометра T , чтобы получить точное время в данный момент.

Очевидно, в зависимости от принятой системы счета времени поправки одного и того же хронометра в один и тот же момент, соответствующий его показанию T , будут численно различаться между собой. Поэтому данное определение необходимо конкретизи-

ровать указанием принятой системы счета времени, например:
поправка хронометра u^* в момент T в системе местного звездного времени s ;

поправка хронометра u в момент T в системе местного среднего времени m ;

поправка хронометра V^* в момент T в системе гринвичского звездного времени S ;

поправка хронометра V в момент T в системе всемирного времени UT1;

поправка хронометра u_{n+1} в момент T в системе декретного времени N пояса T_{n+1} и т. д.

На основе данного определения поправки часов можно дать ей и иную формулировку.

Поправкой хронометра в некоторый момент называется разность между временем в принятой системе счета и показанием хронометра T в этот момент.

В соответствии с этим определением поправки хронометра в системе местного звездного или местного среднего времени в момент T можно записать

$$\left. \begin{aligned} u^* &= s - T; \\ u &= m - T. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Определить поправку хронометра — значит, определить время в этот момент.

Поправку хронометра в системе местного звездного или среднего времени определяют из наблюдений звезд или Солнца. Если известна долгота пункта λ , то поправку хронометра относительно местного звездного или среднего времени можно также определить из приема радиосигналов времени. Поправку хронометра в системе всемирного или гринвичского звездного времени можно определить из приема радиосигналов времени независимо от знания долготы пункта ¹.

Поправка хронометра не остается постоянной, а изменяется с течением времени. Поэтому всегда следует указывать момент T по хронометру, для которого найдена его поправка.

Изменение поправки хронометра за единицу времени называется ходом хронометра.

Для определения среднего значения хода хронометра ω в интервале времени, ограниченном показаниями хронометра T_1 и T_2 , нужно знать поправки хронометра u_1 и u_2 в эти моменты. Тогда ход хронометра определится формулой

$$\omega = \frac{u_2 - u_1}{T_2 - T_1}. \quad (2.5)$$

¹ В этом случае долготу и широту пункта нужно знать приближенно для учета поправки за время распространения радиоволн.

Если интервал времени $T_2 - T_1$ выразить в сутках или часах, или в десятках минут, то в соответствии с этим ход называется суточным, часовым или десятиминутным.

Знак хода хронометра очевидно определяется знаком разности $u_2 - u_1$, так как промежуток времени $\tau = T_2 - T_1$ между двумя последовательными моментами T_1 и T_2 всегда положителен.

Если знак хода отрицателен, т. е. $u_2 - u_1 < 0$, то это означает, что поправка с течением времени уменьшается ($u_2 < u_1$) и хронометр уходит вперед. Если знак хода положителен, т. е. поправка с течением времени увеличивается ($u_2 > u_1$), то хронометр отстает. Так, например, ход звездного хронометра относительно среднего времени отрицателен; суточное значение этого хода близко к величине $-3^m56, 56^s$.

Ход среднего хронометра относительно звездного времени положителен. Его суточное значение близко к величине $+3^m55, 91^s$.

Из этих примеров видно, что качество хронометра определяется не величиной его хода, а колебаниями хода с течением времени или, как их называют, вариациями хода.

Лучшим хронометром считается тот, у которого ход остается постоянным или изменяется в незначительных пределах. Для астрономических определений пунктов 1 и 2 классов инструкция разрешает применять хронометры, у которых средняя квадратическая вариация суточного хода не превосходит $0,5^s$, а вариация двухчасового хода не более $0,06^s$. Если ход хронометра ω известен, то, полагаясь на его постоянство в течение некоторого промежутка времени $T_2 - T_1$ и зная поправку u_1 для момента T_1 , можно найти поправку u для любого другого момента T в пределах данного промежутка.

Вычисление новой величины u по известным величинам u_1 и ω называют передачей поправки на другой момент. С принятыми обозначениями на основании (2.5) можем написать

$$\omega = \frac{u - u_1}{T - T_1},$$

откуда

$$u = u_1 + \omega(T - T_1). \quad (2.6)$$

Если момент T находится в промежутке $T_2 - T_1$, для которого определен ход ω по известным значениям u_2 и u_1 , то передача поправки на момент T осуществлена интерполированием; если же момент T лежит за границами промежутка $T_2 - T_1$, то такая передача осуществляется экстраполированием.

Точность передачи поправки хронометра интерполированием выше точности передачи экстраполированием, так как нет уверенности в постоянстве хода за пределами промежутка $T_2 - T_1$, на котором он определялся. Поэтому передачу поправки хронометра экстраполированием в практике точных астрономических определений, как правило, не применяют.

§ 19. ПРИБОРЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ВРЕМЕНИ

1. Полевой маркопечатающий хронограф ХПМ-3

Хронограф—прибор, предназначенный для автоматической регистрации показаний хронометра, а также замыканий (размыканий) электрической цепи регистрирующих устройств для наблюдений звезд и приема радиосигналов определений в нашей стране широкое применение получил маркопечатающий хронограф ХПМ-3, разработанный в ЦНИИГАиК А. П. Колупаевым. Общий вид прибора представлен на рис. 44, а его принципиальная электрическая схема на рис. 45. В этом хронографе регистрация моментов наблюдений звезд с контактным микрометром производится в системе показаний хронометра.

Средняя квадратическая погрешность регистрации составляет $\leq 0,01^s$.

Запись производится на бумажную ленту шириной 18 мм, намотанную на катушку приставного тамбура 15 (см. рис. 44). Протягивание ленты под печатающим устройством производится с помощью пружинного двигателя патефонного типа с центробежным регулятором оборотов. Пружина двигателя заводится с помощью съемной рукоятки. Непосредственное движение ленте дает ведущий валик двигателя 18, к которому лента прижимается прижимным валиком 7 с регулируемым давлением. Опускают и приподнимают прижимной валик рукояткой 3. Скорость движения ленты регулируется в пределах 12—20 мм/с с помощью ру-

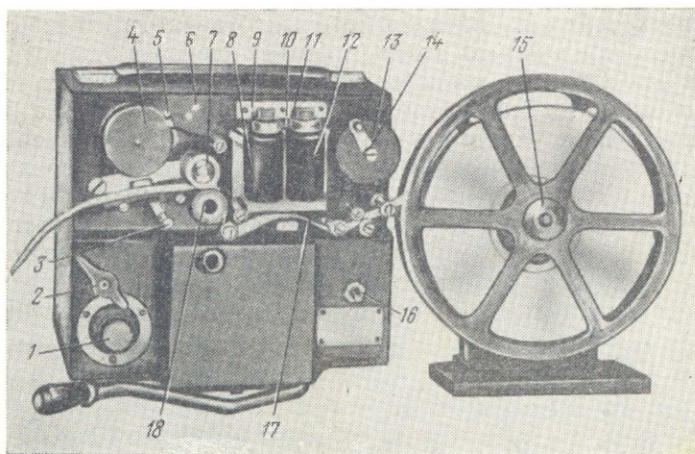


РИС 44. Маркопечатающий хронограф ХПМ-3

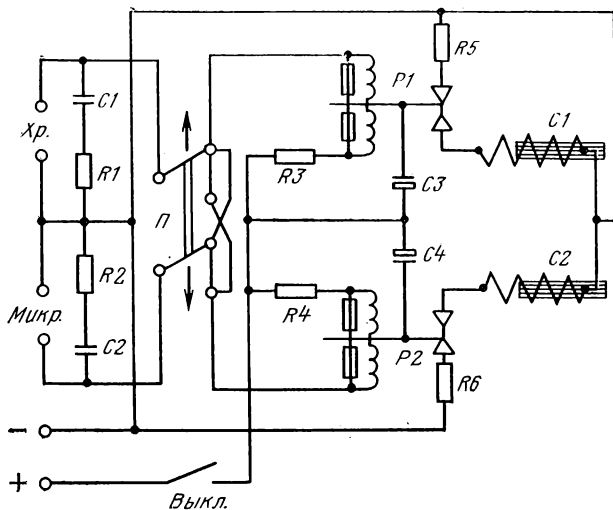


РИС. 45. Принципиальная электрическая схема маркопечатающего хронографа ХПМ-3

коятки 1, имеющей шкалу с условной оцифровкой. Длительность завода пружины зависит от скорости протяжки ленты. При скорости 15 мм/с хронограф нормально работает 4—5 мин. Пуск и остановка пружинного двигателя осуществляются рукояткой 2. При этом одновременно включается или выключается электрическое питание хронографа.

Печатающее устройство хронографа состоит из двух соленоидов 8 и 12 и трех марок 17 — одной рабочей, дающей отпечатки в виде точек, и двух опознавательных с отпечатками в виде вертикальных черточек, одна из которых отпечатывается выше (левый соленоид), а другая ниже (правый соленоид) отпечатка рабочей марки. Отрезок хронографической ленты с записями меток от хронометра и контактного микрометра показан на рис. 46. Стальные марки укреплены на плоских пружинах, расположенных над хронографической лентой под штоками соленоидов. Срабатывание штоков соленоидов происходит под действием коротких импульсов разрядного тока конденсаторов через соответствующие релейные устройства, управляемые одно — контактным хронометром, а другое — контактным микрометром. Хронограф снабжен переключателем 16 (см. рис. 44), меняющим включение соле-

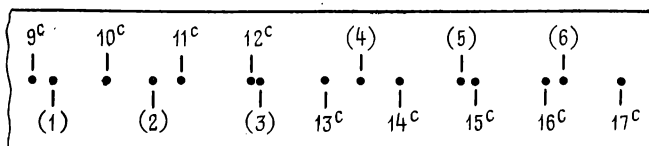


РИС. 46.

ноидов микрометра и хронометра местами. Это позволяет при наблюдении пар звезд исключать параллакс соленоидов.

Шток каждого соленоида может быть отрегулирован по высоте так, чтобы его удар давал на ленте четкий отпечаток марки. Регулировка соленоидов производится путем изменения напряжения спиральных пружин штоков посредством регулировочных гаек и регулировочных винтов 9 и 11. Для получения отчетливой записи изображения марок между марками и хронографической лентой протянута копировальная ленточка от пишущей машинки шириной 13 мм. Копировальная лента намотана на кассету 13 и в процессе работы хронографа перематывается скачками на кассету 4 со скоростью 1—2 мм/с. Обратная перемотка производится от руки вращением специальной рукоятки 14. Перед перемоткой отводится вправо рычаг 5, который отключает защелку, упирающуюся в храповое колесо механизма перемотки копировальной ленты. Обе кассеты 4 и 13 имеют регулируемые тормозные устройства. Головки регулировочных винтов 6 и 10 выведены на лицевую поверхность передней панели.

Питание хронографа осуществляется от сухой батареи типа БАС-80. Включение батареи, микрометра и хронометра производится с помощью штепсельных вилок в соответствующие клеммы, расположенные на задней панели хронографа. При подключении батареи необходимо соблюдать полярность, чтобы избежать пробоя электролитических конденсаторов.

В комплект маркопечатающего хронографа входит прибор ЦНИИГАиК для расшифровки хронографической ленты, изображенной на рис. 47. Прибор позволяет измерять интервалы между метками контактного микрометра и хронометра при скорости движения ленты от 12 до 20 мм/с с погрешностью $0,01^s$.

На основании прибора 3 укреплена ось 1, на которой вращается с помощью рукоятки 8 радиальный сектор 2 с застекленным окном и шкалой 7.

Шкала сектора соприкасается с неподвижным индексом 9. Сектор с помощью пружины прижат вправо до упора 5, имеющего регулировочный винт 6.

При положении сектора на упоре отсчет по шкале должен быть 10,0, что достигается с помощью регулировочного винта 6. Шкала сектора имеет десять оцифрованных делений, соответствующих десятым долям секунды. Сотые доли секунды отсчитываются на глаз по индексу. На стекле сектора нанесены два прямых визирных штриха, соединяющие центр вращения сектора с крайними штрихами его шкалы. Хронографическая лента для измерений пропускается в пазы станины ползуна 10, который с помощью рукоятки 4 может перемещаться под сектором по направляющим. При отсчете 10,0 по шкале сектора ползун перемещается параллельно левому визирному штриху.

Для измерений размеченная хронографическая лента протягивается в прямоугольном пазу столика до тех пор, пока отметка

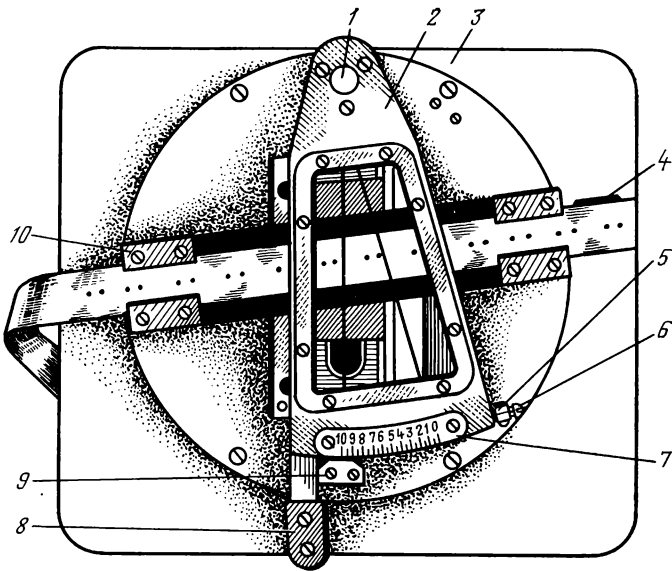


РИС 47. Прибор ЦНИИГАиК для расшифровки хронографической ленты

младшей секунды не совпадает с левым визирным штрихом. Одновременно перемещением ползуна по направляющим добиваются, чтобы правая визирная нить была совмещена с отметкой старшей секунды. Этой операцией устанавливается масштаб секунд на участке измерения. Далее вращением сектора правый визирный штрих наводят на отметку контактного микрометра, расположенную между метками младшей и старшей секунды, и снимают отсчет по шкале сектора. Полный отсчет складывается из номера младшей секунды и отсчета по шкале в сотых долях секунды.

2. Цифропечатающий хронограф 21П

Хронограф 21П предназначен для регистрации моментов электрических импульсов в системе шкалы самого хронографа с погрешностью $0,002^s$. Благодаря высокой стабильности воспроизводимой им шкалы времени хронограф 21П может быть использован при астрономических определениях как часы. В этом случае поправка и ход хронографа относительно эталонного времени определяются из приема радиосигналов точного времени с помощью радиоприемника, снабженного импульсной приставкой; моменты наблюдения звезд с контактным микрометром или любым другим контактным устройством, замыкающим или размыкающим электрическую цепь, регистрируются непосредственно на ленте цифропечатающего хронографа — в системе его показаний. Применение

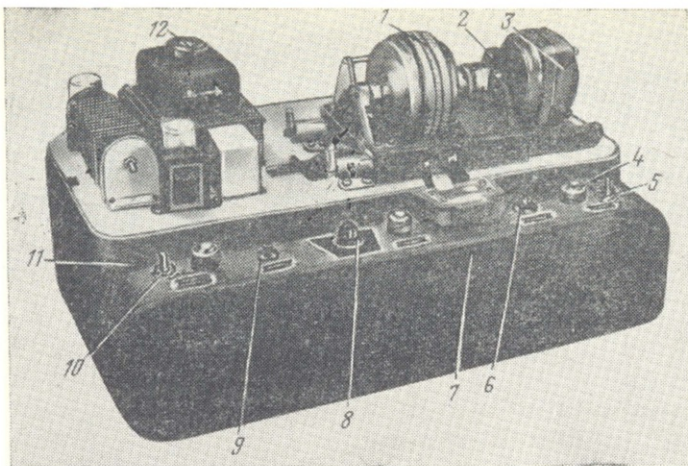


РИС 48. Цифропечатающий хронограф 21П

цифропечатающего хронографа 21П для астрономических определений возможно лишь в том случае, если на пункте имеется источник переменного тока напряжением в 127 или 220 В и частотой 50 Гц.

Общий вид цифропечатающего хронографа 21П представлен на рис. 48. Для печати показаний хронографа используется система согласованно вращающихся дисков с выпуклыми цифровыми знаками на торцевой стороне. Вращение печатных дисков осуществляется синхронным двигателем, питаемым током стабильной частоты. На бумажную ленту шириной 27 мм с помощью ударной силы магнитной системы впечатывается через красящую ленту шириной 13 мм ряд цифр с тех частей дисков, которые в момент подачи импульса тока находились над лентой. После каждого отпечатка следует протяжка ленты.

Хронограф содержит блок из трех печатных дисков 1, редуктор 2, синхронный двигатель 3 на 50 Гц, импульсную схему печатающего и лентопротяжного электромагнитов, механические системы протяжки бумажной и красящей лент, блок питания 12 и пульт управления 7.

На пульте управления хронографа расположены выключатель 10 и сигнальная лампа 11 блока питания хронографа, выключатель 5 и сигнальная лампа 4 питания синхронного двигателя, переключатель вида работы 8, кнопка подачи ленты 6, кнопка контроля печати 9. К хронографу прилагается выносной пульт для дистанционного управления хронографом.

Ток в цепи входа хронографа 30 мА. Источник питания входа хронографа — внутренний. Хронограф способен регистрировать до 13 импульсов тока в секунду.

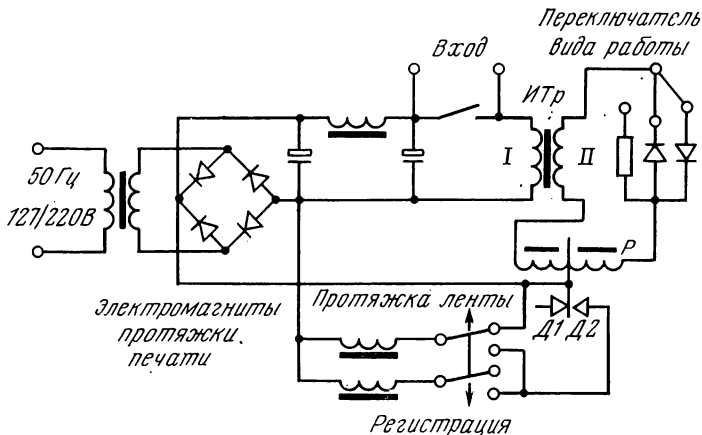


РИС. 49. Принципиальная электрическая схема цифропечатающего хронографа 21 П

Печатающие диски регистрируют минуты от 0 до 59, секунды от 0 до 59, сотые доли секунды от 0 до 99. Впечатываемый неподвижный индекс позволяет брать отсчеты с ленты путем интерполяции сотых долей секунды до $0,002^s$. Диск сотых долей секунды связан двумя парами зубчатых передач с осью синхронного двигателя. Связь между печатающими дисками осуществляется с помощью специальных зубчатых передач, заключенных в полых корпусах дисков. Электрическая схема хронографа в обобщенном виде приведена на рис. 49. Сигналы в виде замыкания или размыкания электрической цепи подаются на первичную обмотку I импульсного трансформатора ИТр. Диоды D1 и D2, включенные последовательно со вторичной обмоткой II импульсного трансформатора и реле P, позволяют избирательно регистрировать замыкание или размыкание цепи электрического тока. В контактную цепь реле P включены электромагниты протяжки ленты и печати. Электромагнит протяжки ленты имеет якорь, который в момент импульса поворачивает храповое колесо и вместе с ним валик для протяжки ленты. Электромагнит печати имеет якорь с ударным резиновым молотком. Запаздывание электромагнита протяжки ленты больше запаздывания срабатывания электромагнита печати. Поэтому протяжка ленты следует после печати, не вызывая смазывания отпечатков.

К хронографу 21П придается кварцевый генератор 22П для питания синхронного двигателя. Кварцевый генератор включает генератор на 72 кГц, делитель частоты до 50 Гц и усилитель мощности.

Суточная вариация частоты кварцевого генератора после двухчасового прогрева не превышает $3 \cdot 10^{-7}$, что в пересчете на время соответствует суточной вариации показаний хронографа 0,03 с.

В конструкции хронографа предусмотрена возможность определения запаздывания срабатывания регистрирующей системы. Величина запаздывания срабатывания хронографа составляет около $0,02^s$ и может быть определена с погрешностью $0,002^s$.

При астрономических определениях выводы контактного микрометра подключаются к гнездам хронографа «Выход». Пример регистрации моментов наблюдений на ленте хронографа показан на рис. 50.

Печатающие диски хронографа вращаются непрерывно и с различной скоростью. Поэтому цифры на ленте, представляющие показание хронографа в момент импульса, располагаются, как правило, не в одну линию. Тире по краям ленты представляют индексы относительно которых производится отсчет. Тире, сопутствующие отпечаткам долей секунды, определяют положение целых сотых долей секунды относительно индекса и позволяют производить интерполяцию до тысячных долей секунды. Порядок считывания показаний с хронографической ленты показан на рис. 50. Питание хронографа осуществляется одновременно от двух источников: от сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением 127 или 220 В и от кварцевого генератора 22П с частотой 50 Гц и напряжением 127—180 В. От сети переменного тока хронограф потребляет в холостом режиме 15 Вт, в момент отпечатка 90 Вт, от генератора 7 Вт. Сам кварцевый генератор потребляет 150 Вт.

Масса хронографа 20 кг, кварцевого генератора 20 кг.

3. Малогабаритное печатающее устройство МПУ8-3

Малогабаритное печатающее устройство МПУ8-3 предназначено для регистрации моментов замыкания (размыкания) входной электрической цепи в системе показаний экспедиционного кварцевого хронометра «Альтаир».

Устройство МПУ8-3 обеспечивает регистрацию в печатном виде информации, поступающей на его входы параллельно или последовательно байтами в двоично-десятичном коде в системе МТК.

Малогабаритное печатающее устройство в комплекте с кварцевым хронометром «Альтаир» позволяет производить:

- регистрацию по команде извне показаний хронометра с дискретностью 1 мс в часах, минутах, секундах и долях секунды;
- регистрацию информации, вводимой оператором с помощью клавиатуры дистанционного пульта управления.

Отсчет Лента

15^{мин} 15 304^с

15 14 457

15 11 212

15 07 538

15 04 365

15	16	91-
16	15	90-
16	15	46-
15	14	45-
16	16	22-
15	11	21-
16	10	08
15	07	54-
16	05	53-
15	04	37-
		36-

РИС. 50

Погрешность регистрации момента внешнего сигнала в системе показаний хронометра не выходит за пределы дискретности последнего разряда, т. е. 1 мс.

Устройство имеет восемь разрядов с 16 знаками в каждом разряде — десять цифр и шесть символов: *, N, S, N^o, запятая, тире.

Шаг между разрядами в строке 2,54 мм, шаг между строками 4,2 мм. Печать осуществляется на бумажной ленте шириной 25 мм. Бумажная лента длиной 50 м в виде бобины обеспечивает 10 000 строк печати. Время готовности устройства к восприятию информации и печати после включения питания менее 3 с.

Параметры сигналов информации — по верхнему уровню не менее +2,4 В, по нижнему уровню не более +0,4 В. Командный сигнал — замыкание или размыкание входной цепи устройства.

В комплект устройства МПУ8-3 входит:

собственно печатающее устройство, имеющее схемы переработки информации, управления печатью и блок стабилизации питания устройства напряжением постоянного тока;

дистанционный пульт управления с клавиатурой ручного ввода информации, переключателями вида работы — замыкание или размыкание цепи командного сигнала и кнопками включения и выключения питания;

блок питания устройства переменным током 220 В, 50 Гц, включающий выпрямитель, фильтр и стабилизатор.

Устройство питается от батареи аккумуляторов напряжением $24 \pm 2,4$ В или от сети переменного тока 220 ± 22 В, 50 Гц. Потребляемая по постоянному току мощность при скорости печати 20 строк в секунду не более 30 Вт.

Масса устройства в комплекте с дистанционным блоком управления и кабелями не более 20 кг. Габаритные размеры регистрирующего устройства $410 \times 225 \times 220$ мм.

Общий вид устройства МПУ8-3 и его функциональная схема приведены на рис. 51 и 52.

В устройстве применен электромеханический механизм печати с электронной схемой управления. В основу работы механизма положен так называемый принцип «печати на ленту», т. е. печать молоточками при непрерывно вращающихся печатающих дисках, имеющих на внешней окружности выпуклые знаки. На поверхность знаков печатающих дисков через раскатный валик с питающего барабана наносится типографская краска. Между печатающими колесами и молоточками располагается бумажная лента. При ударе молоточка по печатающему колесу через бумагу на последней получается оттиск знака. Срабатывание печатающих молоточков происходит под действием печатающих электромагнитов, обмотки которых питаются импульсами, поступающими с электронной схемы управления. За один оборот вала печатающих дисков в каждом разряде может быть отпечатано два знака, так как

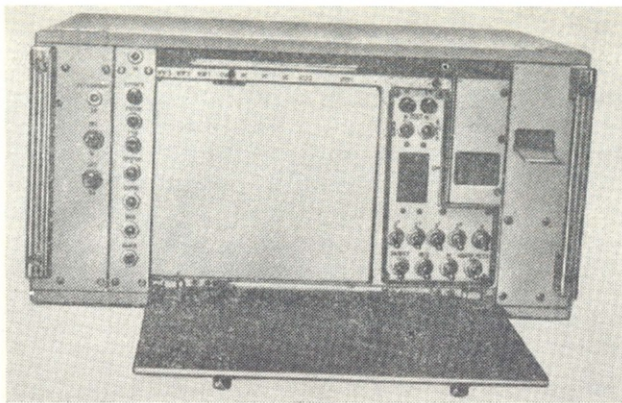


РИС. 51. Малогабаритное печатающее устройство МПУ8-3

на печатающих дисках располагаются два комплекта одинаковых знаков.

Внешняя окружность печатающих дисков условно поделена на 42 равные позиции. Один цикл печати осуществляется с использованием 21 позиции, из которых 16 несут знаки, а сектор из пяти позиций служит для транспорта бумаги. За время прохождения этого сектора перед печатающими молоточками бумага перемещается механическим приводом от электродвигателя на 4,2 мм.

Для получения отпечатков требуемых знаков и своевременного транспорта бумажной ленты на одной оси с валом печатающих дисков смонтирован синхронизирующий генератор индукционного типа. С синхрогенератора за время одного цикла печати (половина оборота знакового вала) выдается один сигнал H перед началом печати, 16 позиционных сигналов CH — по одному на каждой знаковой позиции и один сигнал K в конце цикла печати. Порядковый номер сигнала CH является кодовым признаком знаков находящихся под молоточками печатающего механизма. Вращательные движения знакового вала, диска синхрогенератора и вала подачи бумаги с номинальной скоростью 600 оборотов в минуту обеспечиваются электродвигателем постоянного тока.

Устройство имеет:

- вход ввода параллельной информации с хронометра «Альтаир»;
- вход ввода последовательной информации, совмещенный с вводом сигналов управления с дистанционного пульта управления.

С хронометра «Альтаир» информация о текущем времени, сменяясь каждую миллисекунду, по 32 шинам в виде 8 байтов одновременно поступает на схему параллельной записи информации (схему памяти).

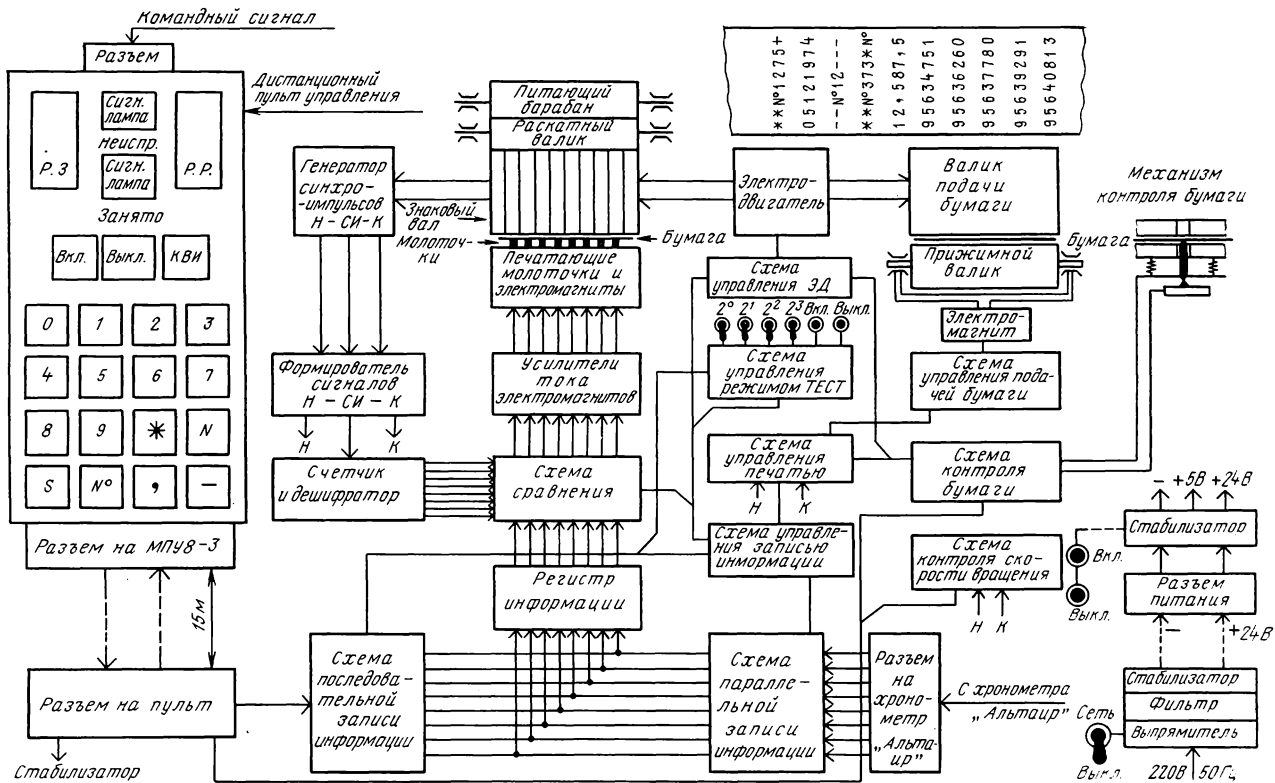


РИС. 52. Функциональная схема малогабаритного печатающего устройства МПУ8-3

Последовательная информация с дистанционного пульта управления по четырем шинам, последовательно по одному байту, подается в схему последовательной записи информации (схему памяти). Код знака вырабатывается в схеме формирователя байтов информации, расположенной в пульте, при нажатии клавиши знака.

С синхрогенератора через формирователь сигналов $H-SH-K$ в дешифратор непрерывно поступает информация в виде числовой последовательности импульсов (от 1 до 16) о знаках, находящихся над молоточками печатающих магнитов. Эта информация в дешифраторе перерабатывается в двоично-десятичный код в системе МТК, аналогичный коду информации, поступающей на входы устройства МПУ8-3. По внешнему командному сигналу, например размыканию или замыканию контактов микрометра астрономического теодолита, информация со схемы параллельной записи информации переписывается в регистр — схему памяти, где хранится в неизменном виде до окончания цикла печати.

При записи информации в схему последовательной информации передача ее в регистр происходит автоматически при подаче восьмого байта информации — нажатии восьмой по счету клавиши пульта управления. Если по характеру информации последняя содержит менее восьми знаков, например номер наблюдаемой звезды 373, то для передачи этой информации в регистр оператор должен подать в схему управления записью дополнительный сигнал, нажав клавишу «КВН» пульта. При этом запись будет иметь вид № 3730000.

По сигналу H начала печати, поступающему с формирователя сигналов $H-SH-K$, информация с регистра переносится в схему сравнения. После выдачи сигнала H за половину оборота знакового вала (0,05 с) с дешифратора в схему сравнения поступают кодовые сигналы 16 знаков. При совпадении кодов знаков в разряде схема сравнения вырабатывает сигнал, который после усиления в усилителе тока электромагнитов заставляет срабатывать молоточек того же разряда. По сигналу K конца печати, поступающему с формирователя сигналов $H-SH-K$, происходит прогон бумаги и перевод регистра информации, схемы сравнения, схемы последовательной записи информации и схем управления записью и печатью в исходные состояния.

Устройство МПУ8-3 включает дополнительные элементы управления и контроля.

Дистанционный пульт управления содержит схему формирования командного сигнала на печать параллельной информации. Схема управляется клавишами регистраций моментов замыкания $P3$ и моментов размыкания PP . При нажатии обеих клавиш регистрируются как моменты замыкания, так и размыкания входной цепи. При нажатии любой из клавиш включается питание электродвигателя и происходит прогон бумаги. Окончание или обрыв бумаги фиксируется механизмом контроля бумаги. При

окончании бумаги схема выключает электродвигатель и подает питание на сигнальную лампу дистанционного пульта «Неиспр».

Вследствие снижения питающего напряжения или увеличения нагрузки на ось ротора электродвигателя может не обеспечиваться номинальная скорость (10 об/с) вращения знакового вала, что вызывает искажение печати информации. Разгон двигателя контролируется схемой контроля скорости вращения. Если после восьми оборотов знакового вала его скорость вращения не достигает номинального значения, схема зажигает сигнальную лампочку *M* на передней панели устройства и сигнальную лампочку «Неиспр» на дистанционном пульте управления.

Перед началом работы с устройством МПУ8-3 рекомендуется проверять правильность, качество и скорость печати. Для этого в устройство включена схема режима «ТЕСТ». Однозначная для всех разрядов информация набирается с помощью тумблеров 2^0 , 2^1 , 2^2 и 2^3 на передней панели устройства. При нажатии кнопки «Вкл», расположенной там же, происходит печать выбранного тумблерами знака. Нажатие кнопки «Выкл» прекращает тестовую печать. Скорость выдачи информации в режиме «ТЕСТ» — 20 строк/с.

На переднюю панель устройства выведены некоторые узловые точки схемы, которые посредством измерительных приборов — вольтметра и осциллографа — позволяют контролировать и при необходимости регулировать работу схемы.

На рис. 52 приведена форма записи наблюдения звезды теодолитом с контактным микрометром:

- первая строка — номер пункта наблюдения;
- вторая » — дата наблюдения;
- третья » — условный номер наблюдателя;
- четвертая » — номер звезды по каталогу;
- пятая » — показания уровня;
- шестая и далее строка — моменты срабатывания контактного микрометра.

§ 20. СЛУЖБА ВРЕМЕНИ

1. Краткая историческая справка о методах определения долгот пунктов и развитии службы времени

История создания и развития службы времени самым тесным образом связана с историей методов определения долгот астрономических пунктов. Как известно, долгота определяемого пункта относительно начального (исходного) пункта численно равняется разности одноименных времен, определенных в этих пунктах одновременно или приведенных к одному и тому же моменту с помощью известных ходов хронометров, т. е.

$$\lambda = s - S = m - UT.$$

Время s или t на определяемом пункте определяется из соответствующих наблюдений светил с помощью рабочих часов или хронометра и астрономического теодолита. Время начального (исходного) пункта первоначально определялось из наблюдений моментов таких небесных явлений, которые можно было считать одновременными для всех точек земной поверхности. К таким явлениям относятся: затмения Солнца, Луны, спутников некоторых планет (например, спутников Юпитера), покрытие звезд Луной, численные значения угловых расстояний между Луной и звездами и т. п.

Все указанные явления заранее предвычислялись во времени начального меридиана. На определяемом пункте с помощью рабочих часов (хронометров), поправка которых относительно местного времени известна, производилось наблюдение этих явлений. Сравнение наблюденного момента данного явления в системе местного времени с заранее предвычисленным моментом в системе времени начального меридиана позволяло вычислить долготу определяемого пункта относительно начального.

Предвычисление моментов указанных выше небесных явлений в системе времени начального меридиана и составление необходимой информации об этих явлениях в виде таблиц явилось первым зародышем службы времени, которая решала задачу определения времени начального меридиана для некоторых отдельных явлений и задачу передачи информации об этих явлениях. После изобретения хронометра (середина XVIII столетия) и до изобретения проводного телеграфа (середина XIX столетия) задача воспроизведения и хранения времени начального меридиана решалась прямым путем — путем «транспортировки времени» начального меридиана на определяемые пункты с помощью многих высокоточных хронометров.

Принципиальная схема определения долготы вновь определяемого пункта относительно начального (исходного) состоит из:

1. Определения поправки и хода рабочего хронометра (времени) на начальном (исходном) пункте из наблюдений светил.

2. Сравнения показаний рабочего хронометра с хронометрами-хранителями времени с помощью специального хронометра-нониуса (хронометра-тринадцатибойщика, который за 6 с делает не двенадцать полусекундных ударов, а тринадцать).

Практически обе указанные операции на исходном пункте производились в течение многих рабочих вечеров. Из этих определений тщательно выводились поправки хронометров-хранителей относительно времени начального меридиана, численные значения их суточных и часовых ходов, а также вариации этих ходов, на основании которых вычислялись веса определяющие качество хронометров.

3. Транспортировки всех хронометров на определяемый пункт.

4. Определения поправки рабочего хронометра на определяемом пункте из наблюдений светил.

5. Сравнения показаний рабочего хронометра с хронометрами-хранителями времени при помощи тринадцатибойщика. Определение поправки и сравнение показаний рабочего хронометра на определяемом пункте также выполнялись в течение нескольких вечеров.

6. Обратной транспортировки хронометров на исходный пункт.

7. Определения на исходном пункте такие же, как в пунктах 1 и 2.

При определении долгот основных и фундаментальных пунктов, как правило, участвовали две наблюдательные партии, одна из которых начинала работу на исходном, а другая на определяемом пункте. Каждая партия имела десятки хронометров-хранителей времени и совершала несколько прямых и обратных хронометрических рейсов. Так, например, в 1843—1844 гг. было выполнено определение разности долгот между Гринвичем и Пулковым через промежуточный пункт Альтону. Для этой связи было выполнено 16 хронометрических рейсов, в которых перевозилось 68 хронометров-хранителей времени. Определение поправки рабочего хронометра производилось пассажными инструментами из наблюдений звезд в меридиане.

Как видно, на данном этапе развития науки и техники каждый астроном имел свою транспортируемую службу времени. Оснащение службы времени состояло из:

прибора для наблюдений звезд азимутальными или зенитальными способами;

рабочего хронометра, поправка и ход которого определялись из соответствующих наблюдений светил;

хронометров-хранителей времени в системе начального пункта;

хронометра-нониуса для сравнения показаний рабочего хронометра с хронометрами-хранителями времени;

транспортных средств для транспортировки всего комплекса приборов с исходного пункта на определяемый.

Задачами этой службы времени являлись:

определение времени (поправки и хода рабочего хронометра) из наблюдений звезд,

передача времени начального меридиана с рабочего хронометра на хронометры-хранители времени путем сравнения их показаний,

исследование ходов хронометров-хранителей времени, а также вариаций этих ходов; установление качества хронометров,

хранение времени начального меридиана с помощью хронометров-хранителей времени,

транспортировка хронометров-хранителей времени меридиана начального пункта на определяемый.

Изобретение проводного телеграфа в середине XIX столетия позволило коренным образом изменить методику определения долгот тех пунктов, которые можно было связать проводной связью

с основным (исходным) пунктом. Информацию о времени в системе исходного пункта оказалось возможным передавать на значительные расстояния в виде сигналов замыкания или размыкания цепи тока контактного устройства часового механизма передающих часов. Для определения времени на основном пункте стало возможным применять большие пассажные инструменты и высокоточные маятниковые часы стационарного типа, для которых создавались условия, обеспечивающие постоянство их хода.

Задачами службы времени, организуемой на таком основном пункте, являлись:

систематическое определение времени (поправки часов) из наблюдений светил,

хранение времени с помощью высокоточных часов (обычно нескольких), поправки и ход которых определяются из систематических наблюдений светил,

передача сигналов времени по проводному телеграфу на определяемый пункт.

Первый опыт определения разности долгот по телеграфу в России был проведен в 1860 г. офицерами корпуса военных топографов. В 1863 г. была определена разность долгот по телеграфу между Москвой и Пулковым. С 1873 по 1876 г. военные геодезисты определяли по телеграфу долготы пунктов в 12 городах, расположенных вдоль сибирской магистрали от Москвы до Владивостока, а также долготы Тегерана и Константинополя.

По мере распространения телеграфной сети в России телеграфный метод определения долгот астрономических пунктов стал основным. На долю хронометрических рейсов оставались только те отдаленные районы, где телеграфная сеть отсутствовала.

В последней четверти прошлого столетия задачи службы времени стали выходить за рамки астрономических определений. С развитием науки, техники, транспорта, связи, усиления экономических отношений между различными странами, появились новые потребители, остро нуждающиеся в знании точного времени. Однако проводная телеграфная связь ограничивала возможности его использования.

В 1895 г. русский ученый А. С. Попов сделал одно из величайших открытий человечества — изобрел радио. Вскоре после этого, буквально через несколько лет, многие обсерватории различных стран мира начали регулярные передачи сигналов времени по радио. В нашей стране первый опыт определения долготы по радиотелеграфу был произведен в 1910 г. военными геодезистами Н. Н. Матусевичем и О. Г. Дитцем под руководством Ф. Ф. Витрама. Ими была определена по радио долгота маяка Богшер в Балтийском море. В 1912 г. Международная Парижская конференция впервые широко обобщила опыт передачи времени по радио и учредила орган для координации работ по определению, хранению и распространению точного времени — Международное бюро времени.

В 1913 г. в Пулковской обсерватории под руководством Ф. Ф. Витрама удалось наладить регулярный прием сигналов времени по радио с Эйфелевой башни и из Нордейха (Германия). Сигналы принимались с записью на хронограф посредством телеграфного ключа, который замыкался в такт с сигналами времени, слышимыми в телефоне. Часть сигналов времени с Эйфелевой башни принималась на слух, по методу совпадений.

В 1914 г. была осуществлена и первая отечественная передача сигналов времени по радио через только что организованную 100-киловаттную радиостанцию в Петрограде. Эти передачи были организованы в целях фундаментального определения долготы Пулкова относительно Парижа.

Создание современных Международной и национальных служб времени относится к началу 20-х годов текущего столетия. Необходимость воспроизведения единой шкалы времени в международном и национальных масштабах возникла в связи с бурным развитием средств проводной и радиосвязи, транспортных средств, стандартизации средств измерения и, наконец, производства астрономо-геодезических работ и картографирования.

В 1919 г. в Брюсселе решением Международного совета по научным исследованиям при Лиге Наций было утверждено положение об организации и деятельности Международного бюро времени (МБВ). Основным содержанием деятельности МБВ являлось: передача радиосигналов точного времени; прием радиосигналов точного времени, передаваемых национальными службами времени; совместная обработка результатов астрономических наблюдений времени, поступающих от национальных обсерваторий, пожелавших участвовать в работе Бюро, и, наконец, издание бюллетеней окончательного времени моментов передачи радиосигналов времени в системе УТО. Только в 1931 г. бюллетени МБВ впервые содержат время моментов передачи десяти сеансов радиосигналов времени, вычисленное путем совместной обработки результатов приема радиосигналов и астрономических определений времени девяти обсерваторий.

В нашей стране Пулковская обсерватория приступила с декабря 1920 г. к регулярной ежедневной передаче сигналов точного времени (ритмических сигналов) через Петроградскую радиостанцию «Новая Голландия», а с мая 1921 г. — через Московскую Ходынскую радиостанцию мощностью в 300 кВт. В 1924 г. при Пулковской обсерватории был учрежден Межведомственный комитет службы времени под председательством директора обсерватории.

Комитет службы времени во многом способствовал дальнейшему развитию службы времени в СССР, оснащению ее совершенными приборами и часами. Комитет издавал особые бюллетени с моментами ритмических сигналов отечественных и заграничных радиостанций по приемам их в Пулковской обсерватории и во Всесоюзном институте метрологии (Главная палата мер и весов),

а с 1928 г. — сводные моменты ритмических сигналов по результатам работы нескольких Служб времени.

В 1931 г. по инициативе Комитета в Москве были организованы две новые Службы времени — в обсерватории Государственного астрономического института им. Штернберга (ГАИШ) и в ЦНИИ-ГАиК.

В 1938 г. в СССР систематическую работу вели семь Служб времени: Пулковская, ВНИИМ (Ленинград), ГАИШ и ЦНИИ-ГАиК (Москва), Ташкентская, Харьковская, Николаевская. Все они придерживались одних методов определения и хранения времени. В те годы время определялось из наблюдений звезд в меридиане с помощью пассажных инструментов с контактным микрометром. Для определения и хранения времени использовались высокоточные маятниковые часы Шорта с вариацией суточного хода $0,002—0,003^s$. Для передачи по радио ритмических сигналов времени использовались специальные часы — нониус, передающие в течение одной средней минуты 61 сигнал, из них 60 — в виде коротких звуковых точек длительностью около $0,1^s$ и одно звуковое тире длительностью около $0,4^s$, разделяющее минуты.

С середины пятидесятих годов нашего столетия начался новый этап развития службы времени. Возросшие требования к точности измерения времени, предъявляемые современной наукой астрономо-геодезической службой, геофизикой и другими службами, поставили на повестку дня вопрос о техническом перевооружении служб времени. На смену морально изжившим себя астрономически маятниковым часам пришли кварцевые часы с высокостабильными кварцевыми генераторами. Вариации суточного хода таких часов выражаются единицами десяти тысячных долей секунды. Для хранения времени, кроме кварцевых генераторов, стали широко использоваться квантовомеханические атомные (цезиевые) и молекулярные генераторы, имеющие еще более высокую стабильность, чем кварцевые генераторы.

На смену субъективному методу наблюдений звезд с контактным микрометром пришел объективный метод фотоэлектрической регистрации звездных прохождений. Прием радиосигналов времени для сравнения показаний часов различных служб времени производится совершенным осциллографическим способом, позволяющим сравнивать эти показания с точностью до $0,00001^s$. Для определения времени из наблюдений звезд наряду с пассажными инструментами применяются призменные астролябии Данжона, а также фотографические зенитные трубы.

Наличие в службах времени высокостабильных кварцевых и атомных генераторов частоты позволило в последние годы совместить задачи определения, хранения и передачи эталонного времени с задачей передачи по радио эталонной частоты, необходимой для эталонирования современной радиотехнической аппаратуры. Поэтому государственная служба времени была переименована в «Государственную службу времени и частоты СССР». Ра-

бота этой службы направляется Государственным комитетом стандартов Совета Министров СССР.

Организационное руководство государственной службой времени возложено на Межведомственную комиссию единой службы времени при Государственном комитете стандартов Совета Министров СССР. Выполнение решений Межведомственной комиссии было возложено на одновременно организованное Центральное научно-исследовательское бюро единой службы времени, позднее преобразованное во Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). В 1977 г. в Государственную службу времени и частоты СССР входило 12 служб времени. Кроме того, при вычислении «Всемирного времени» используются работы государственных служб времени социалистических стран — БНР, ГДР, МНР, ПНР, СРР, ЧССР, СФРЮ.

При вычислении редуций к среднему полюсу (условному началу) привлекаются данные международного бюро времени (МБВ).

Государственная Служба времени СССР выполняет следующие задачи:

непрерывно воспроизводит шкалу эталонного атомного времени на основе государственного атомного эталона времени и частоты (ГЭВЧ);

производит сличение государственного первичного атомного эталона времени и частоты с аналогичными международным эталоном (Париж) и вторичными эталонами, используемыми для передач сигналов времени и частоты;

выполняет контроль передач радиосигналов времени и частоты и определяет поправки к моментам выхода сигналов времени с антенны радиопередатчиков относительно государственного эталона;

производит астрономические определения времени в ряде пунктов Советского Союза, в результате которых определяются поправки к моментам передачи радиосигналов времени в системе УТО; результаты определений точного времени представляют необходимый материал для изучения неравномерностей вращения Земли;

вычисляет и публикует бюллетени «Всемирного времени», в которых даются поправки к сигналам времени в системах АТ и УТ1;

ежегодно публикует расписание передач сигналов времени и частоты, в котором указываются время передач, позывные радиостанций, несущие частоты, программы передач, координаты радиостанций и ряд других сведений.

2. Шкалы времени

В современной практике разнообразных физико-технических измерений и астрономических наблюдений находят широкое применение различные системы измерения времени.

Для обеспечения единства измерений времени, как и других физических величин, необходимо воспроизведение, хранение и передача размеров единиц с помощью эталонов и образцовых средств измерений. Начальным звеном в метрологической схеме передачи размеров единиц измерений является эталон. Эталон представляет собой комплекс технических средств и обусловленную технологию измерений, обеспечивающие воспроизведение и хранение единицы физической величины в соответствии с ее определением.

Всемирное время

Практическая целесообразность и процесс развития научного познания предопределили использование в качестве средства воспроизведения единицы измерения времени вращение Земли вокруг оси и обращение Земли вокруг Солнца.

За единицу времени были приняты средние солнечные сутки эпохи наблюдения и средняя секунда, равная $1/86\,400$ части средних солнечных суток. Шкала времени, основанная на этой единице и ее долях, была признана эталонным временем. В работе служб времени оказалось целесообразным использовать среднее время начального меридиана — всемирное время УТ.

Таким образом, шкала всемирного времени УТ базируется на вращении Земли вокруг своей оси и формируется на основе астрономических наблюдений. Различают три разновидности УТ:

УТ₀ — среднее солнечное время гринвичского меридиана, полученное путем непосредственных астрономических наблюдений;

УТ₁ — это УТ₀, откорректированное с учетом движения полюсов Земли;

УТ₂ — это УТ₁, откорректированное с учетом сезонных изменений скорости вращения Земли.

Шкала УТ₁ находит широкое применение в астрономии, навигации, геодезии, космических исследованиях, т. е. во всех случаях, когда производятся определения положений космических тел в системе координат, связанной с вращающейся Землей, или положения наблюдателя в системе географических координат по результатам наблюдений космических тел.

Всемирное время лежит в основе гражданского счета времени. В необходимых случаях от шкалы всемирного времени переходят к шкале звездного времени по известным формулам сферической астрономии.

Вследствие различной природы неравномерностей вращения Земли длительность средних солнечных суток изменяется, что приводит к отклонению шкалы УТ₁ от равномерного времени.

Эфемеридное время

При решении многих задач современной физики и астрономии пользоваться неравномерной шкалой времени нельзя. Поэтому возникла необходимость разработки и практической реализации равномерной шкалы времени.

В 1960 г. на XI Генеральной конференции по мерам и весам было принято решение в качестве эталона времени принять длительность тропического года на эпоху 1900,0. Шкала времени, основанная на этом эталоне, получила название эфемеридного времени — ЕТ.

В этой шкале сутки определяются как $1/365,24219878177$ часть тропического года эпохи 1900,0. Эфемеридная секунда определяется как $1/86400$ часть этих суток, или $1/31556925,9747$ часть тропического года эпохи 1900,0.

Воспроизведение эфемеридной единицы измерения времени и шкалы, соответствующей этой единице, осуществляется через среднее солнечное время УТ и поправок к нему, определяемых из специальных астрономических наблюдений Луны, т. е.

$$ET = UT + \Delta T.$$

В результате вычислений многочисленных наблюдений Луны и внутренних планет Солнечной системы было получено выражение для

$$\Delta T = 24,349^s + 72,318^s T + 29,950^s T^2 + 1,82144^s B, \quad (2.7)$$

где T — в юлианских столетиях от 1900,0;

B — флуктуация долготы Луны ($B = L_{\oplus}^{\text{наб}} - L_{\oplus}^{\text{эф}}$).

Первые два члена в формуле для ΔT наилучшим образом согласовывают только начало и длительность эфемеридных суток с началом и средней длительностью средних солнечных суток в интервале определения астрономических постоянных дифференциальных уравнений движения небесных тел.

Эфемеридное время ЕТ не тождественно математическому абсолютно равномерному ньютоновскому времени, однако является определенным приближением к нему.

Эфемеридное время, являясь аргументом выражений законов небесной механики, необходимо астрономам для изучения движения планет.

Установление нового эталона — эфемеридной секунды и соответствующей шкалы времени не решило задачи воспроизведения шкалы равномерного времени. Определение поправки ΔT с точностью, сопоставимой с точностью определения среднего времени, потребовало осреднения результатов наблюдения Луны в интервале, равном году. Причины, мешающие повышению точности определения ΔT , труднопреодолимы. Это — малая видимая скорость движения Луны, значительные ошибки регистрации Луны, обусловленные ее фазами.

Среднее Солнечное время, через которое определяется эфемеридное время, помимо неравномерностей, учитываемых поправкой ΔT , имеет сезонную неравномерность, являющуюся следствием изменения момента инерции Земли относительно оси вращения.

Длительность средних солнечных суток в течение года изменяется до 0,7 мс. Сезонная неравномерность средних солнечных суток из астрономических наблюдений определена быть не может.

Атомное время

Рациональное решение задачи установления единицы измерения времени, постоянство и воспроизводимость которой отвечали бы современным требованиям метрологии, было найдено в процессах микромира. Молекулы и атомы некоторых веществ в переменном электрическом поле возбуждаются и изменяют свое энергетическое состояние на резонансной частоте, свойственной только молекулам или атомам данного вещества. Резонансная частота, генерируемая атомно-молекулярными системами, чрезвычайно мало зависит от внешних условий и конструкции систем. Это обеспечивает высокую стабильность во времени и воспроизводимость частоты таких систем. К концу пятидесятых годов наилучшие стабильность и воспроизводимость показал квантовый генератор на парах цезия.

С 1958 по 1965 г. частота цезиевого квантового генератора определялась в системе эфемеридного времени и в 1967 г., в соответствии с решением XIII Генеральной конференции по мерам и весам, было принято новое определение единицы измерения времени — атомной секунды и соответствующей ей шкалы атомного времени.

А т о м н а я с е к у н д а равна интервалу времени, в течение которого совершается 9192631770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии внешних воздействий.

На основе эталонов с атомным пучком цезия, стабильность воспроизведения частоты которых оценивается относительной погрешностью $5 \cdot 10^{-12}$, службами времени воспроизводится ш к а л а а т о м н о г о в р е м е н и АТ.

Дальнейшие поиски методов воспроизведения высокостабильных частот привели к созданию водородного генератора, обладающего всеми основными преимуществами атомно-молекулярных систем. Стабильность частоты современных квантовых генераторов на атомарном водороде достигает $5 \cdot 10^{-14}$ и является самой высокой по сравнению со всеми известными конструкциями атомно-молекулярных генераторов.

Из сравнения генератора на атомном водороде с цезиевым эталоном времени и частоты определена его частота, которая оказалась равной 1 420405751,8 Гц.

Государственный атомный эталон времени и частоты (ГЭВЧ) СССР состоит из:

- группы генераторов на атомарном водороде;
- группы кварцевых часов;
- вспомогательной электронной аппаратуры.

Эталон позволяет воспроизводить единицу времени и частоты с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-12}$, что соответствует возможному отклонению атомной шкалы времени от равномерной за десятилетний период на 0,3 мс. Поэтому шкала атомного времени АТ практически является равномерной.

Шкала атомного времени Советского Союза АТ (SU) — национальная шкала атомного времени, воспроизводимая Государственным эталоном времени и частоты СССР, в которой размер единицы времени — секунды соответствует атомной секунде, а начало отсчета совмещено со шкалой всемирного времени UT2 в 12 ч всемирного времени 1 января 1964 г.

Международная шкала атомного времени ТА1 — шкала атомного времени, воспроизводимая групповым эталоном, составленным из лучших национальных эталонов стран, сотрудничающих с международным бюро времени.

Координированное время UTC

Шкала координированного времени UTC — шкала, в которой единичный интервал времени равен атомной секунде, а для обеспечения максимального приближения к шкале UT1 счет времени может меняться дискретно на 1 с первого числа месяца (предпочтительно на границе смежных кварталов года) в 00 часов всемирного времени так, чтобы расхождение UT1—UTC не превышало 0,9 с. Когда расхождение между шкалами UT1 и UTC приближается к предельно допустимому значению (0,9 с), то по рекомендации МБВ все радиостанции, передающие сигналы времени, корректируют передачу сигналов ровно на 1 с путем введения дополнительной «положительной» или «отрицательной» секунды. «Положительная» дополнительная секунда начинается в 23^h59^m60^s и заканчивается в 00^h00^m00^s первого дня месяца. Когда вводят «отрицательную» секунду, то после сигнала, соответствующего 23^h59^m58^s, спустя 1 с передают сигнал, соответствующий 00^h00^m00^s первого дня месяца.

Шкала координированного времени Советского Союза UTC (SU) — это шкала UTC, в которой размер единичного интервала времени соответствует шкале АТ (SU), а временное положение секундных меток согласовано со шкалой UTC МБВ с погрешностью не более 0,1 мс.

3. Сигналы времени

Все передаваемые отечественными радиостанциями сигналы времени формируются на основе шкалы равномерного координированного времени Советского Союза UTC (SU), воспроизводимой Государственным эталоном времени и частоты СССР, которая согласована со шкалой UTC МБВ с погрешностью, не превышающей 0,1 мс.

Начало переднего фронта сигналов времени, излучаемых радиостанциями Советского Союза, согласуются со шкалой координированного времени UTC (SU) с погрешностью, не превышающей 100 мкс. Несущие частоты и временные интервалы эталонных сигналов радиостанций поддерживаются постоянными и соответствуют определению секунды в международной системе единиц (СИ). Среднесуточные значения несущих частот сигналов, излучаемых радиостанциями Советского Союза, согласуются с размерами единиц времени и частоты, воспроизводимыми Государственным эталоном времени и частоты СССР с относительной погрешностью не ниже $1 \cdot 10^{-10}$.

Начало переднего фронта сигналов проверки времени (шесть точек), передаваемых через сеть всесоюзного радиовещания, согласуются с отметками шкалы UTC (SU) с погрешностью, не превышающей 100 мс.

Моменты сигналов времени зарубежных радиостанций, излучаемых, как правило, в координированной системе UTC относительно национальных эталонов времени и частоты, могут отличаться от моментов сигналов времени радиостанций Советского Союза не более чем на 1 мс.

Сигналы времени отечественных радиостанций излучаются в телеграфном режиме, т. е. в виде несущей, модулированной по амплитуде прямоугольными импульсами определенной длительности и частоты следования. Для передачи временных отметок используются сигналы с периодами следования 1 мин, 1 и 0,1 с. Длительность сигналов с периодом 1 с составляет 100 мс. Сигналы, приходящиеся на начало каждой минуты, удлиняются до 500 мс. Длительность сигналов с периодом следования 0,1 с составляет 20 мс. Сигналы, приходящиеся на начало каждой секунды, удлиняются до 40 мс.

Часовые программы работы радиостанций в 1977 г. показаны графически на рис. 53.

Сигналы проверки времени (шесть точек) передаются в телефонном режиме, частота модуляции несущей 1 кГц. Сигналы передаются один раз в час в виде пакета из шести прямоугольных импульсов длительностью 0,1 с каждый и периодом следования 1 с. Начало шестого импульса соответствует началу часа — 00 мин 00 с.

Передача сигналов времени радиостанциями, входящими в систему координированного времени, сопровождаются информацией о числовом значении и знаке разности шкал времени UT1—UTC. Информация о числовом значении в десятых (DUT1) и сотых (dUT1) долях секунды и знаке разности шкал времени UT1—UTC = DUT1 + dUT1 передается отечественными радиостанциями после каждого минутного сигнала времени путем маркирования дополнительными импульсами соответствующих секундных сигналов. Положительное значение DUT1 передается маркированием n секундных сигналов в интервале от 1 до 7 с так, что

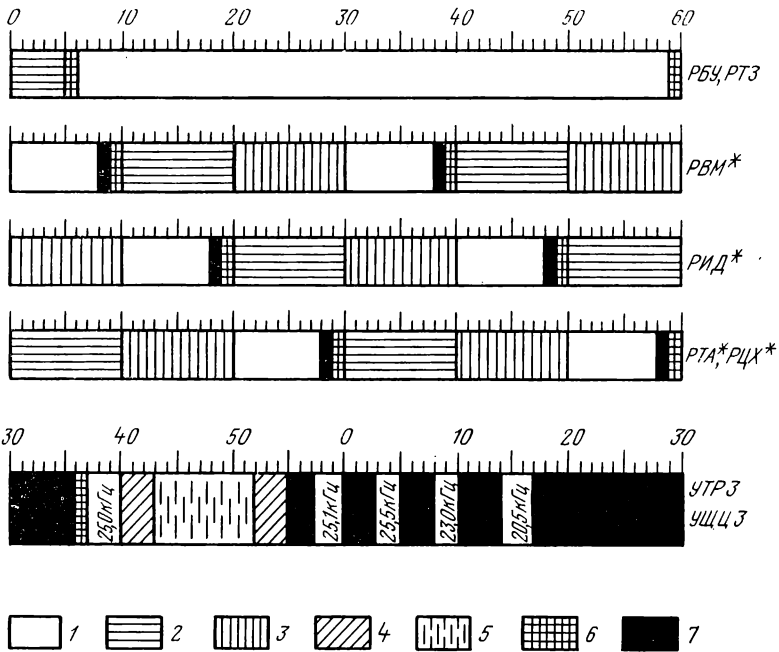


РИС. 53. Часовые программы работы радиостанций:

1 — сигналы АО; 2 — секундные сигналы и информация DUT1 + dUT1; 3 — сигналы А1 с частотой 10 Гц; 4 — сигналы А1 с частотой 40 Гц; 5 — сигналы А1 с частотами следования 10; 1; 1/10 и 1/60 Гц; 6 — сигналы опознавания; 7 — передатчик выключен

* Сигналы времени 56, 57, 58, 59-й секунд, следующие после (5*n* - 1)-й минуты (где *n* = 1, 2, 3, ..., 12), пропускаются.

$DUT1 = +0,1 n$ секунды. Отрицательное значение $DUT1$ передается маркированием *m* секундных сигналов в интервале от 9 до 15 с, так что $DUT1 = -0,1 m$ секунды. Отсутствие маркированных сигналов в интервале между минутным сигналом и 15-ой секундой означает, что $DUT1 = 0^s$.

Дополнительная информация $dUT1$, уточняющая $DUT1$, передается маркированием *P* секундных сигналов в интервале от 21 до 24 с, так что $DUT1 = +0,02 p$ секунды. Отрицательное значение — маркированием *q* секундных сигналов в интервале от 31 до 34 с, так что $dUT1 = -0,02 q$ секунды.

Информация о числовом значении и знаке разности шкал времени $UT1 - UTC$ передается также с помощью кода Морзе каждый час по 1 мин, после позывных радиостанций в соответствии с часовой программой (см. рис. 53). Информация о положительном значении разности шкал времени начинается с кода единицы, а отрицательная — с нуля. Таким образом, информация передается с помощью трех цифр: первая означает знак разности, а две

последующие — абсолютное ее значение. Каждая группа чисел кода Морзе из трех цифр отделяется друг от друга знаком раздела (.—), цифры передаются с интервалом, соответствующим длительности трех тире. За одну минуту информация о разности шкал времени повторяется 7—8 раз.

На рис. 54 приведены примеры кодирования информации о разности шкал времени UT1 — UTC, а также образец маркирования секундных сигналов.

Средняя квадратическая погрешность значения поправки (DUT1 + dUT1) около 0,01 с.

Время передачи радиосигналов времени в системе UTC относится к моментам выхода радиосигналов с антенн радиостанций.

Момент передачи сигналов времени в системе UT1 вычисляется по формуле

$$UT1 = UTC + (DUT1 + dUT1), \quad (2.8)$$

где UTC — программное координированное время передачи радиосигналов.

Помимо информации о разности (UT1 — UTC), даваемой в процессе передачи радиосигналов времени, Госстандарт СССР публикует предварительные и окончательные значения этих разностей, а также координаты мгновенного полюса X и Y в системе Условного международного начала ОСJ (по данным МБВ) в виде двух бюллетеней «Всемирного времени» серии А и Е.

В бюллетенях серии А, выпускаемых еженедельно, содержатся предварительные (срочные) значения разностей UT1 (SU) — UTC (SU) в 0,1 мс на семь дат для эпохи 0 ч всемирного времени и координаты полюса X и Y в 0,001" на те же даты и эпоху. Для эпохи передачи радиосигналов отличной от 0 ч всемирного времени значения UT1 (SU) — UTC (SU) находят интерполированием по формуле

$$(UT1 - UTC)_T^n = (UT1 - UTC)_0^n + [(UT1 - UTC)_0^{n+1} - (UT1 - UTC)_0^n] \frac{UT^n}{24}, \quad (2.9)$$

где n и $n + 1$ — даты предшествующая и последующая эпохе UT.

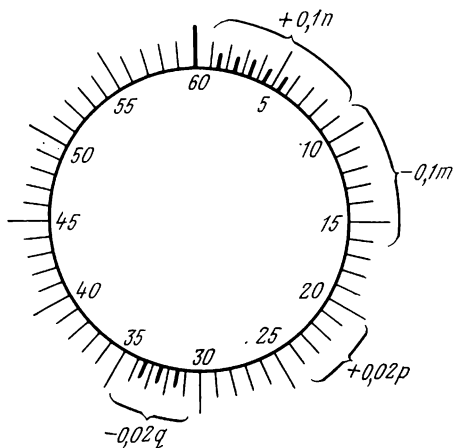


РИС. 54. Примеры кодирования информации о разности шкал времени UT1—UTC

$$n = +5; p = -3 \quad DUT1 + dUT1 = 5 \cdot 0,1 \text{ с} - 3 \cdot 0,02 \text{ с} = +0,44 \text{ с}$$

Для радиосигналов, моменты передачи которых отличаются от программных моментов более чем на 0,1 мс, сообщается поправка DT к программному моменту UTC , так что

$$UT1_{\text{сигн}} = UTC + (UT1 - UTC) + DT. \quad (2.10)$$

В бюллетенях серии E, выпускаемых ежеквартально, содержатся окончательные значения разностей $UT1(SU) - UTC(SU)$ в 0,1 мс на каждую дату квартала для эпохи 0 ч всемирного времени, координаты полюса X и Y в 0,001" на те же даты и эпоху, а также таблица поправок DT . Принцип построения и использования бюллетеня E тот же, что и бюллетеня A.

Международное бюро времени (МБВ) публикует информацию в том же виде, как и Служба времени СССР, но для большего количества передающих сигналы времени радиостанций.

§ 21. РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

Сигналы времени отечественных и большинства зарубежных радиостанций излучаются в телеграфном режиме, т. е. в виде несущей, модулированной по амплитуде прямоугольными импульсами частоты.

Для прослушивания этих сигналов через телефон радиоприемник должен иметь второй гетеродин, заполняющий прямоугольные импульсы несущей звуковой частотой обычно около 1000 Гц.

Для регистрации радиосигналов времени на хронографе радиоприемник должен иметь специальный выход, выдающий радиосигналы в виде импульсов постоянного тока, — электронное реле.

Для эксплуатации в полевых условиях радиоприемник должен питаться от источника постоянного тока и потреблять минимальную энергию.

Перечисленные требования исключают применение всех без исключения бытовых приемников и ограничивают возможности применения служебных радиоприемных устройств.

При астрономических определениях географических координат и азимутов в настоящее время используют два типа радиоприемников: радиоприемник Р-311 с дополнительным электронным реле — импульсной приставкой и радиоприемник «Астра», специально разработанный для астрономических определений.

1. Краткая характеристика радиоприемного устройства Р-311

Переносный ламповый приемник Р-311 предназначается для слухового приема телеграфных и телефонных радиопередач в диапазоне частот от 1 до 15 МГц (300—20 м). Р-311 построен по супергетеродинной схеме с однократным преобразованием частоты.

Общий вид приемника со стороны передней панели показан на рис. 55.

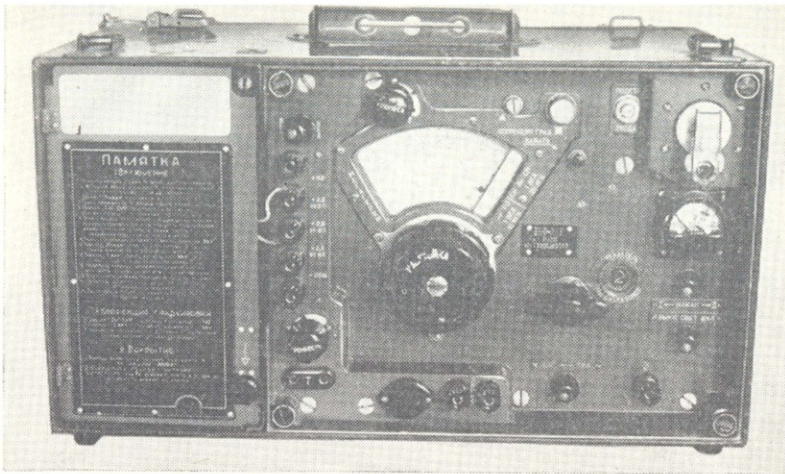


РИС. 55. Переносный ламповый приемник Р-311

Диапазон частот приемника разбит на пять поддиапазонов. Чувствительность приемника с антенной «наклонный луч» при отношении напряжения сигнала к напряжению собственных шумов 3 : 1 и напряжении на нагрузке (телефон ТА-56М) не ниже 7,5 мкВ.

Полоса пропускания усилителя промежуточной частоты регулируется плавно от 300 Гц до 16 кГц.

Радиоприемник Р-311 имеет два выхода:

трансформаторный выход, к которому могут быть подключены одна или две пары головных низкоомных телефонов ТА-56М;

трансформаторный выход на внешнюю линию с сопротивлением 1500 Ом.

Питание приемника осуществляется от аккумулятора 2КН-24 и анодной батареи БАС-80 (вибропреобразователя ВП-3М2).

При номинальных напряжениях питания анодный ток приемника не превышает 14 мА, ток накала без освещения шкалы и визира — не более 0,5 А. Аккумулятор 2КН-24 обеспечивает непрерывную работу приемника в течение 24 ч при работе с анодной батареей.

Органы управления, контроля и коммутации расположены на передней панели радиоприемника, которая при хранении или перевозке приемника закрывается крышкой. Приемник включается в работу тумблером «Выкл-вкл.». Напряжение накала и анодное напряжение контролируются по вольтметру.

Настройка приемника на заданную частоту производится переключателем диапазонов с индикацией номеров поддиапазонов в иллюминаторе «Указатель поддиапазонов» и ручками плавной

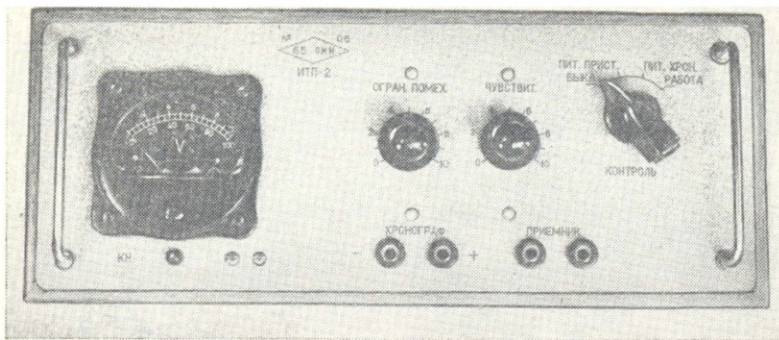


РИС. 56. Импульсная приставка ИТП-2 к радиоприемнику Р-311

настройки «Настройка» с индикацией по шкалам, оцифрованным в десятках килогерц.

При приеме сигналов времени переключатель «ТЛГ-ТЛФ» устанавливается в положение «ТЛГ». В зависимости от условий приема радиосигналов времени ручкой «Полоса» устанавливается ширина полосы пропускания усилителя промежуточной частоты. Ручкой «Громкость» подбирается напряжение выходного сигнала, обеспечивающее стабильную работу импульсной приставки. Гнезда «Т» предназначены для подключения головного телефона ТА-56М, клеммы «Линия» используют для подключения импульсной приставки, придаваемой к радиоприемнику Р-311.

Импульсная приставка ИТП-2 предназначена для преобразования сигналов времени, поступающих с выхода радиоприемника Р-311 модулированными звуковой частотой, в сигналы постоянного тока, необходимые для управления регистрирующим устройством — хронографом ХПМ-3. Общий вид приставки со стороны панели управления показан на рис. 56.

Схема приставки включает фильтр, настроенный на частоту, близкую к 1000 Гц, усилитель переменного тока, ограничитель по минимуму, детектор и усилитель постоянного тока. Наличие в приставке фильтра обязывает оператора настраивать приемник так, чтобы биения звукового сигнала были близки к частоте 1000 Гц. Ограничитель позволяет полностью убрать помехи на выходе приставки, если они не превышают одной трети от полезного сигнала. Приставка за исключением усилителя постоянного тока питается от встроенной батареи КБС-Л-0,50. Усилитель постоянного тока, нагруженный обмоткой реле хронографа ХПМ-3, питается от внешней батареи БАС-80, подключаемой к клеммам хронографа.

Радиосигналы времени с выхода радиоприемника подаются на гнезда приставки «Приемник», хронограф ХПМ-3 с учетом полярности подключается к гнездам «Хронограф».

Напряжения источников питания и работа приставки контролируются с помощью индикаторного прибора. В положении «Пит. прист.» переключателя «Контроль» прибор показывает напряжение встроенной батареи, которое не должно быть менее 3 В; в положении «Пит. хрон.» — прибор показывает напряжение внешней батареи, которое не должно быть менее 70 В.

Положение ручки «Чувствит.» определяется уровнем сигналов времени, поступающих с радиоприемника, а положение ручки «Огран. помех» — относительным уровнем помех.

В положении «Работа» переключателя «Контроль» индикаторный прибор показывает работу выхода приставки. В идеальном случае при прохождении сигнала стрелка должна отклоняться вправо до 40—60 делений, а при отсутствии сигнала находиться на нуле.

Кнопка «Кн» при нажатии разрывает выходную цепь приставки — на хронограф ХПМ-3 сигналы не подаются. Этот оперативный орган облегчает маркировку хронограмм.

2. Полевой транзисторный приемник «Астра»

Радиоприемник «Астра» предназначен для приема радиосигналов времени и проверки времени с регистрацией их с помощью экспедиционного кварцевого хронометра «Альтаир», маркопечатающего хронографа ХПМ-3 или электронно-лучевого осциллографа. Радиоприемник также позволяет производить слуховой прием сигналов двухполосной амплитудной телефонии и амплитудной телеграфии по методу биений. Радиоприемник «Астра» построен по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты и состоит: из супергетеродинного средневолнового радиоприемника, работающего в пределах частот 150—1500 кГц, и конвертеров на сверхдлинноволновый (12÷150 кГц) и коротковолновый (2500÷25 000 кГц) диапазоны.

Чувствительность приемника при отношении напряжений сигнала и собственных шумов 3 : 1 и при выходном напряжении 1,5 В на нагрузке 100 Ом (телефон ТА-56М) для коротковолнового диапазона составляет 6 мкВ, для средневолнового — 10 мкВ и для сверхдлинноволнового — 30 мкВ.

Полосы пропускания усилителей промежуточной частоты (УПЧ): широкая (ШП) — 9 кГц и узкая (УП) — 1,2 кГц. Ручная (РРУ) и автоматическая (АРУ) регулировка усиления осуществляется в пределах 60 дБ.

Приемник «Астра» имеет выходы:

а) с усилителя второй промежуточной частоты 128 кГц с регулируемым напряжением от 0 до 1,5 В на нагрузке 3000 Ом для запуска (синхронизации) экспедиционного кварцевого хронометра «Альтаир» и осциллографической регистрации сигналов;

б) с усилителя низкой частоты с регулируемым напряжением не менее 1,5 В для слуховой настройки приемника с помощью го-

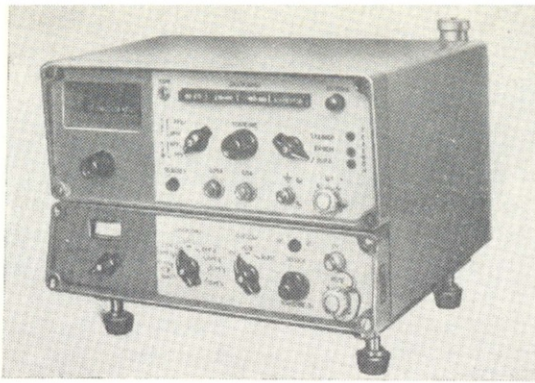
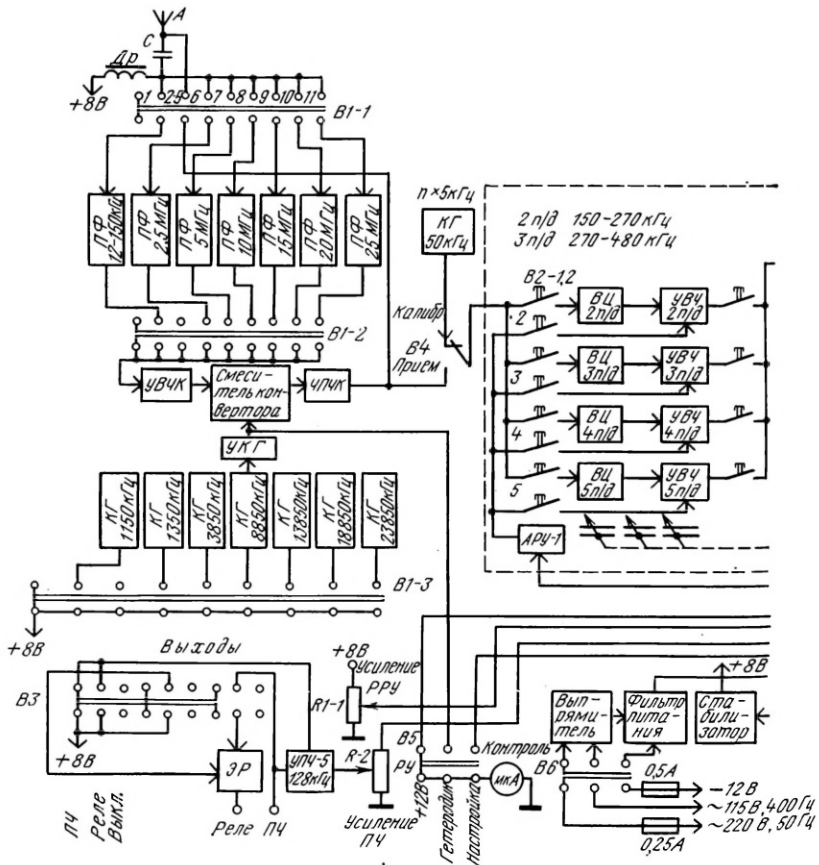


РИС. 57. Полевой транзисторный радиоприемник «Астра»



ловных телефонов ТА-56М и определения поправки кварцевого хронометра «Альтаир» слуховым методом;

в) с электронного реле для регистрации сигналов при помощи маркопечатающего хронографа ХПМ-3.

Значения задержки сигнала на выходах промежуточной частоты, низкой частоты и релейном определяется экспериментальным путем заводом-изготовителем для каждого экземпляра радиоприемника и записываются в его формуляре. Средняя квадратическая нестабильность задержки сигнала с выхода промежуточной частоты после прогрева не превышает 100 мкс; на низкочастотном и релейном выходах задержки могут отличаться от указанных в формуляре не более чем на 0,5 мс.

Питание радиоприемника возможно:

от внешнего источника постоянного тока $12 \pm 1,2$ В;

от сети переменного тока 220 ± 22 В, 50 Гц;

от сети переменного тока 115 ± 12 В, 400 Гц.

Потребляемая мощность по постоянному току 6 Вт, при настройке приемника 15 Вт.

Вид радиоприемника «Астра» со стороны внешней панели изображен на рис. 57, а его функциональная схема — на рис. 58.

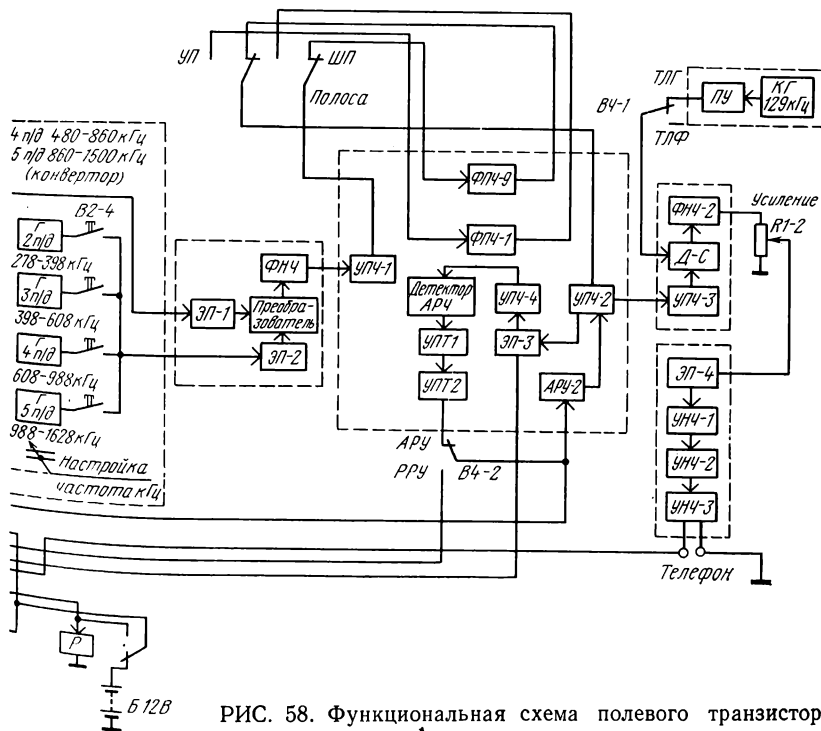


РИС. 58. Функциональная схема полевого транзисторного приемника «Астра»

Перед началом работы с приемником переключателем, расположенным в люке на верхней стороне кожуха, устанавливается вид питания — ≈ 12 В, ~ 115 В или ~ 220 В. Приемник включается на прием или калибровку шкалы настройки по встроенному генератору с помощью переключателя «Питание». Настройка приемника на заданную частоту производится кнопочным переключателем средневолнового диапазона, переключателем гетеродина сверхдлинноволнового и коротковолновых поддиапазонов «Диапазоны» и ручной плавной настройки внутри каждого поддиапазона.

Частота настройки радиоприемника в килогерцах высвечивается на световом табло, которое после настройки для экономии расхода энергии выключается.

Радиовещательная программа и сигналы проверки времени могут приниматься только на частотах четырех средневолновых поддиапазонов. Переключатель «Диапазоны» устанавливается в положение «1,15 МГц», а кнопочный переключатель — на частоту выбранной программы. Переключатель вида работы устанавливается в положение «ТЛФ АРУ» или «ТЛФ РРУ», переключатель «Полоса» — в положение «ШП».

При приеме радиосигналов времени в сверхдлинноволновом и коротковолновых диапазонах кнопочный переключатель устанавливается в положение «Конвертер», соответствующее частоте средневолнового диапазона 860—1500 кГц, а переключатель «Диапазоны» — на поддиапазон принимаемой радиостанции. Переключатель «Вид работы» устанавливается в положение «ТЛГ АРУ» или «ТЛГ РРУ». В зависимости от условий приема тумблером «Полоса» устанавливается ширина полосы пропускания усилителя промежуточной частоты, 9 кГц — ШП или 1,2 кГц — УП.

Ручками «Усиление» и «Усиление ПЧ» устанавливается усиление радиоприемника соответственно по низкой частоте и промежуточной частоте.

Переключателем «Выходы» включаются элементы схемы радиоприемника, обеспечивающие подачу сигналов на выходы устройства. В положении «Реле» сигналы подаются на разъем «Реле» для подключения кабеля на хронограф ХПМ-3. В положении переключателя «ПЧ» сигналы подаются на разъем «ПЧ» для подключения высокочастотного кабеля на хронометр «Альтаир» или на осциллограф. В положении переключателя «Выкл» оба выхода не работают, и сигналы могут прослушиваться только через телефоны ТА-56М, подключаемые к гнездам «Телефон». Переключатель «Контроль» обеспечивает включение индикаторного прибора в различные цепи приемника. В положении «+12 В» контролируется напряжение постоянного тока питания радиоприемника. В положении «Гетер» контролируется работа гетеродина конвертера в соответствии с положениями переключателя поддиапазонов. В положении «Настройка» прибор служит индикатором настройки приемника на несущую частоту принимаемых сигналов.

Ось со шлицем «Корр» служит для коррекции показаний шкал средневолнового диапазона. При установке индекса на калибровочные точки шкал через телефоны должен прослушиваться звук низкого тона — «Нулевые биения». Вращением оси корректора добиваются «Нулевых биений» в двух-трех точках каждого из четырех средневолновых поддиапазонов.

§ 22. ПРИЕМ РАДИОСИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ

Принять радиосигналы времени — значит определить показание хронометра в момент выхода сигнала с антенны передающей станции. С целью ослабления влияния случайных погрешностей приема, как правило, принимают несколько (8—10) сигналов. В этом случае в результате приема вычисляют показание хронометра в средний момент передачи сигналов. Для приведения полученного показания хронометра к моменту выхода соответствующего сигнала с антенны передающей станции необходимо учесть поправки за время распространения радиоволн, а также за время задержки в цепях приемного устройства. Для вычисления поправки τ_p за время распространения радиоволн очевидно необходимо знать скорость распространения радиоволн и расстояние от передающей станции до пункта, в котором производится прием радиосигналов. Флуктуации скорости и изменения траектории распространения сигналов приводят к погрешности определения поправки τ_p . Методы определения задержки сигналов определяются особенностями распространения радиоволн в различных диапазонах.

Радиоволны ВЧ диапазона (3—30 МГц) значительно поглощаются при отражении ионизированных слоев F_1 и F_2 , которые расположены на высотах 160—400 км. Сезонные, суточные и случайные изменения концентрации электронов приводят к значительным флуктуациям высоты отражения радиосигналов. Такой механизм распространения радиоволн ограничивает точность привязки шкал времени погрешностью до 0,3—2 мс. Поправка за время распространения радиосигналов ВЧ диапазона (в мс) может быть определена с помощью эмпирической формулы

$$\tau_p = 0,9 + 3,25 \frac{L}{1000}, \quad (2.11)$$

где L — расстояние между передатчиком и приемником, вычисленное по дуге большого круга Земли;

$$L = z \cdot 1,852 \text{ км}, \quad (2.12)$$

здесь z — центральный угол в минутах, соответствующий дуге большого круга между пунктами на поверхности Земли;

$$\cos z = \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta\lambda, \quad (2.13)$$

φ_1, φ_2 — широты пунктов передачи и приема (с точностью до 1'); $\Delta\lambda$ — разность долгот (с точностью до 1').

Для расстояний 500—5000 км погрешность τ_p не превышает 1—2 мс.

Радиоволны НЧ диапазона (30—300 кГц) могут распространяться как вдоль поверхности (земная волна), так и отражаясь от слоев D и E ионосферы (пространственная волна). Нижние слои ионосферы D и E (70—100 км) характеризуются большой стабильностью, что определяет постоянство времени распространения радиоволн и высокую точность привязки шкал времени.

Время распространения пространственной волны может быть определено из соотношения

$$\tau_p = \frac{L}{v}, \quad (2.14)$$

где $v = 299\,693$ км/с — скорость распространения сигналов с учетом атмосферной рефракции; L — расстояние между передающими и приемными пунктами.

Погрешность определения времени распространения τ_p в этом случае не превышает 5—10 мкс.

Радиоволны ОНЧ диапазона (3—30 кГц) распространяются в волноводе, образованном поверхностью Земли и нижней границей ионосферы.

Сигналы времени в ОНЧ диапазоне имеют большую длительность фронта, что ограничивает точность привязки шкал времени погрешностью 100—200 мкс.

Практически поправки τ_p за время распространения радиоволн выбирают из специальных таблиц по аргументам: название радиостанции (координаты φ_2 и λ_2), диапазон волн, координаты φ_1 и λ_1 пункта приема.

Поправка τ_n за время задержки в цепях приемного устройства, как указывалось выше, определяется из специальных исследований приемной аппаратуры. Показание хронометра в средний момент передачи сигналов с учетом поправок за время τ_p распространения радиоволн и за время τ_n задержки приемной аппаратуры вычисляется по формуле

$$X = X' - \tau_p - \tau_n, \quad (2.15)$$

где $X' = \frac{\sum X'_i}{n}$ — показание хронометра в средний момент приема радиосигналов, выведенное как среднее арифметическое из зафиксированных показаний хронометра X'_i .

Прием секундных сигналов координированного времени производится, как правило, автоматически. В полевых условиях для этой цели необходимо иметь:

Радиоприемник

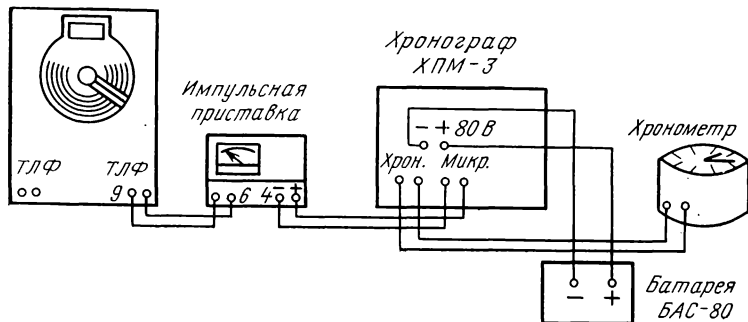


РИС. 59. Блок-схема приборов для автоматического приема радиосигналов времени

радиоприемник со вторым гетеродином и чувствительностью в пределах 2—15 мкВ, обеспечивающий уверенный прием удаленных радиостанций (Р-311, «Астра» и др.);

импульсную приставку, преобразующую радиосигналы времени в импульсы тока (в случае применения радиоприемника «Астра» импульсная приставка не требуется);

хронограф, служащий в этом случае для автоматической записи показаний хронометра и импульсов от радиосигналов времени; хронометр;

питание, обеспечивающее работу радиоприемника, импульсной приставки и хронографа.

Блок-схема указанных приборов для автоматического приема радиосигналов времени показана на рис. 59.

Для приема радиосигналов времени приемник настраивается на несущую частоту передающей радиостанции, выбранную из расписания. Затем включают импульсную приставку и хронограф. При этом сигналы времени подаются с выходных клемм радиоприемника на входные гнезда приставки. Радиоприемник должен работать в режиме телеграфных сигналов. При правильной установке тона и уровня сигнала отклонение стрелки индикатора приставки должно находиться от трети до половины шкалы индикатора. При этой установке тона частота биений будет составлять около 1000 Гц. При этой частоте импульсная приставка обладает максимальной чувствительностью и помехоустойчивостью.

Усиленные избирательным усилителем приставки сигналы детектируются и подаются на электронное реле, которое срабатывает под их воздействием и тем самым управляет работой соленоида хронографа. Работой второго соленоида хронографа управляет контактное устройство хронометра.

Таким образом, на ленте хронографа автоматически записываются радиосигналы времени и показания хронометра. Для расшифровки записи на ленте необходимо пометить начало каждой

минутной серии радиосигналов и начало минуты показаний хронометра. При этом для импульсов секундных сигналов на ленте подписываются часы, минуты и секунды координированного времени, а для импульсов от хронометра — часы, минуты и секунды, соответствующие показанию хронометра. После такой записи установить остальные секунды сигналов времени и показаний хронометра не составляет труда.

Запись сигналов времени, с учетом фиксирования на ленте маркировочных минутных меток хронометра и начала минутной серии радиосигналов, достаточно производить в течение 1,5—2 мин. Для обработки приема радиосигналов достаточно выбрать 10 отчетливо записанных импульсов. При этом они могут располагаться как подряд, так и через произвольное число секунд. Измерение расстояний между метками выбранных импульсов радиосигналов и ближайшими к ним младшими метками показаний хронометра производится с помощью прибора ЦНИИГАиК для расшифровки хронографической ленты (см. рис. 47).

Пример приема секундных сигналов координированного времени приведен в графах 1 и 2 табл. 2.

В зависимости от решаемой задачи по результатам приема радиосигналов можно вычислить поправку хронометра в момент X в системе всемирного времени UT1 или в системе звездного гринвичского времени S ; если известна долгота пункта λ , то можно вычислить поправку хронометра в системе местного среднего времени t или в системе местного звездного времени s .

При вычислении поправки хронометра в системе местного времени (t или s) с приближенной долготой пункта λ_0 погрешность в значении поправки хронометра ΔU будет численно равняться погрешности $\Delta \lambda$ принятого значения долготы (без учета погрешности приема радиосигналов). Для всех указанных случаев поправка хронометра вычисляется по единой формуле: время в средний момент передачи радиосигналов в принятой системе счета минус показание хронометра в этот момент.

В системах местного среднего или местного звездного времени поправки хронометра соответственно будут:

$$u = t - X, \quad (2.16)$$

$$u^* = s - X. \quad (2.17)$$

В графе 3 табл. 2 приведен пример вычисления поправки хронометра в системе местного звездного времени s , а в графе 4 — в системе местного среднего времени t . Значения s и t вычисляются по известным формулам сферической астрономии

$$s = S + \lambda, \quad (2.18)$$

где

$$S = S_0 + UT1 + \mu UT1, \quad (2.19)$$

$$t = UT1 + \lambda.$$

Хронометр звездный № 384

12 августа 1976 г. Радиостанция РИД 5 мГц UTC = 10^h30^m $\tau_p = 0,001^s$, $\tau_n = 0,002^s$, $\lambda = 2^h30^m34,160^s$

UTC Координированное время (программное) подачи сигналов	Показания хронометра X'_i в моменты UTC	Вычисление поправки хронометра	
		в системе местного звездного времени	в системе местного среднего времени
1	2	3	4
10 ^h 30 ^m 50 ^s 55	10 ^h 23 ^m 01,12 ^s 06,12	$S_0 = 21^h19^m58,774^s$ $UT1 = 10\ 31\ 19,660$	$UT1 = 10^h31^m19,660^s$ $\lambda = 2\ 30\ 34,160$
31 00	11,13	$\mu UT1 = 1\ 43,711$	$m = 13\ 01\ 53,820$
10	21,18	$S = 7\ 53\ 02,145$ $\lambda = 2\ 30\ 34,160$	$X = 10\ 23\ 30,696$
15	26,19	$s = 10\ 23\ 36,305$ $X = 10\ 23\ 30,696$	$u = +2^h38^m23,124^s$ в момент
20	31,20	$u^* = +5,619^s$ в момент	$X = 10^h23,5^m$
30	41,24	$X = 10^h23,5^m$	
35	46,24		
45	56,27		
55	24 06,30		
UTC = 10 ^h 31 ^m 19,500 ^s DUT1 = +0,10 ^s	$X' = 10^h23^m30,699^s$ $\tau_p = 0,001$ $\tau_n = 0,002$		
dUT1 = +0,06	$X = 10^h23^m30,696^s$		
UT1 = 10 ^h 31 ^m 19,660 ^s			

Если по результатам приема радиосигналов времени определены поправки хронометра u_1 и u_2 в моменты X_1 и X_2 , то на основании формулы (2.5) можно вычислить ход хронометра в той системе времени, в которой вычислены поправки

$$\omega = \frac{u_2 - u_1}{X_2 - X_1}. \quad (2.20)$$

При окончательных вычислениях приема радиосигналов времени вводят поправки за разность шкал всемирного и координированного времени, выбираемые из бюллетеней всемирного времени с погрешностью, не превышающей 0,1 мс.

В этом случае формула для вычисления всемирного времени UT1 в средний момент передачи сигналов имеет вид

$$UT1 = UTC + (UT1 - UTC) + DT, \quad (2.21)$$

где $(UT1 - UTC)$ — окончательное значение поправки за разность шкал всемирного и координированного времени; DT — поправка за уклонение момента излучения радиосигналов времени от программных моментов.

В остальном вычисление поправки и хода хронометра из приемов радиосигналов времени остается без изменений. Результаты специальных исследований показывают, что средняя квадратическая погрешность автоматического приема секундных сигналов координированного времени по приведенной выше методике с помощью хронографа ХПМ-3 не превышает 3 мс.

§ 23. ИССЛЕДОВАНИЕ ХРОНОМЕТРОВ. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ХРОНОМЕТРА

Хронометры перед выездом на астрономические работы необходимо исследовать. Целью исследований является определение суточных и часовых ходов и оценка качества хронометра. Полное исследование должно содержать не менее 10 суточных ходов. Оценка качества хронометра выполняется по среднему квадратическому колебанию суточного хода или по средней квадратической вариации суточного и часового хода.

Для исследования хронометра ежедневно в одни и те же часы принимают радиосигналы координированного времени, подаваемые одной и той же, уверенно принимаемой радиостанцией. При исследовании звездного хронометра поправки и ход хронометра вычисляют в системе звездного времени, а при исследовании среднего хронометра — в системе координированного времени.

При исследовании механического хронометра его завод необходимо производить ежедневно после приема сигналов времени.

Суточный ход хронометра для каждых двух смежных суток вычисляется по формуле

$$\omega_i = \frac{u_{i+1} - u_i}{(X_{i+1} - X_i)^d}, \quad (2.22)$$

где $u_{i+1} - u_i$ — разность поправок хронометра для двух смежных суток; $(X_{i+1} - X_i)^d$ — разность показаний хронометра в средние моменты приема, выраженная в сутках.

Среднюю квадратическую вариацию суточного хода хронометра вычисляют по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (\delta_i)^2}{n-1}}, \quad (2.22)$$

где $\delta_i = \omega_{i+1} - \omega_i$ — разность смежных суточных ходов, n — число суточных ходов, принятых для вычисления δ .

Инструкцией при астрономических определениях пунктов Лапласа разрешается применение морских хронометров, у которых средняя квадратическая вариация суточного хода не превосходит 0,5 с, а вариация двухчасового хода — не более 0,06 с.

Имея в виду, что суточная вариация кварцевого генератора может достигать 1 мс, а погрешности определения поправки хронометра и флуктуация времени распространения радиоволн — 2 мс, средняя квадратическая вариация суточного хода кварцевого хронометра «Альтаир», полученная из таких исследований может достигать 3 мс.

Пример исследования кварцевого хронометра Альтаир приведен в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Исследование кварцевого хронометра N 036034

Москва, 1976 г. $t_{cp} = +20^\circ \text{C}$

Дата	Время UTC_i	Радиостанция	Поправки v_i	Ход ω_i	Вариации δ_i
13.6	17 02	Р В М	+0,315	0,000	
14.6	03	Р В М	0,315	-0,001	-0,001
15.6	03	Р В М	0,314	-0,001	0
16.6	02	Р В М	0,313	+0,001	+0,002
17.6	03	Р В М	0,314	-0,002	-0,003
18.6	02	Р В М	0,312	+0,001	+0,003
19.6	02	Р В М	0,313	-0,002	-0,003
20.6	03	Р В М	0,311	+0,002	+0,004
21.6	02	Р В М	0,313	-0,002	-0,004
22.6	03	Р В М	0,311	-0,001	+0,001
23.6	02	Р В М	0,310		

$$\sum (\delta_i)^2 = 0,000065$$

Средняя квадратическая вариация суточного хода

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (\delta_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,000065}{9}} = 0,0027^s.$$

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ТЕОДОЛИТА

24. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Приборы, предназначенные для астрономических определений, необходимо детально исследовать как в лабораторных, так и в полевых условиях. Материалы исследований прилагают к отчету об астрономических определениях, а результаты исследований заносятся в паспорт установленной формы.

В лабораторных условиях, перед выездом на полевые работы, исследуются:

- оптические качества трубы;

- правильность работы и погрешности винтов микроскопов-микрометров и окулярного микрометра. В оптических астрономических теодолитах — правильность работы оптического микрометра;

- погрешности диаметров горизонтального круга; погрешности диаметров вертикального круга исследуются только в том случае, если предполагаются точные измерения зенитных расстояний светил;

- правильность вращения алидадной части теодолита;

- правильность вращения трубы вокруг горизонтальной оси; погрешности цапф горизонтальной оси (на интерферометре Уверского методом ЦНИИГАиК);

- цена деления и качество уровней (на экзаменаторе, по способу проф. Васильева);

- эксцентриситет горизонтального круга. Эксцентриситет вертикального круга исследуется в том случае, если будут производиться измерения зенитных расстояний светил;

- цена деления барабанов окулярных микрометров главной и поверительной труб (на коллиматоре);

- рен микроскопов-микрометров или оптических микрометров; боковое гнутие трубы (с автоколлимационной насадкой ЦНИИГАиК);

- цена оборота контактного микрометра (на коллиматоре);

- мертвый ход контактного микрометра;

- ширина контактов;

- пробные измерения горизонтального угла между коллиматорами, расположенными на разных зенитных расстояниях, применительно к программе определения азимута по Полярной.

Из этих измерений устанавливается постоянство коллимационной ошибки главной трубы.

В полевых условиях производятся следующие исследования теодолита:

определение цены делений уровней по способу Комстока; определение делается один раз, в начале полевого периода;

определение цены оборота окулярного микрометра главной трубы (контактного микрометра) из наблюдений звезд в элонгации или в меридиане; определение делается дважды — в начале и в конце полевого периода, для чего каждый раз наблюдаются четыре звезды;

определение расстояний боковых нитей сетки от средней; определение делается один раз — в начале полевого периода из наблюдений прохождений 6—8 звезд в меридиане;

определение рена микроскопов горизонтального круга; определение делается на первом пункте. На остальных пунктах следят за изменением рена по материалам азимутальных наблюдений. Рен микроскопов вертикального круга определяют в случае точных измерений зенитных расстояний светил;

определения ширины контактов контактного микрометра производят на каждом полевым пункте;

определение мертвого хода контактного микрометра производят в каждый вечер наблюдений;

определение бокового гнуптия трубы при азимутальных наблюдениях; это исследование целесообразно производить на каждом пункте;

правильность вращения алидадной части теодолита вокруг вертикальной оси; поверяется на каждом полевым пункте по показаниям накладного или талькоттовского уровня.

Кроме указанных исследований на каждом полевым пункте перед началом наблюдений производятся следующие проверки и юстировки теодолита:

ось накладного уровня должна находиться в одной плоскости с горизонтальной осью трубы и быть ей параллельна;

горизонтальная ось трубы должна быть перпендикулярна к вертикальной оси теодолита;

средняя горизонтальная нить (подвижная нить контактного микрометра) при наблюдениях зенитальными способами должна быть горизонтальна. При наблюдениях азимутальными способами средняя вертикальная нить (подвижная нить контактного микрометра) должна быть вертикальна;

визирная ось трубы должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси;

место зенита вертикального должно быть меньше 1'.

С преобладающей частью перечисленных выше исследований и проверок, с их теорией и практикой учащийся знаком из предшествующих курсов геодезии и геодезического инструментоведения.

Поэтому в настоящей главе мы ограничимся кратким изложением лишь тех исследований, которые не изучались ранее или являются характерными только для астрономических наблюдений.

§ 25. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ТРУБЫ

К оптике труб астрономических приборов предъявляются повышенные требования, так как при астрономических наблюдениях используется значительная часть поля зрения трубы.

Оптические качества зрительной трубы проверяются по наблюдениям яркой звезды как в центре поля зрения, так и на удалениях от него до $1/3$ радиуса поля зрения. При хорошем качестве оптики и правильной фокусировке трубы звезда должна быть видна в поле зрения в виде малого яркого и резко очерченного диска без всяких лучей, сияний, придатков и заметного окрашивания.

При нарушении фокусировки трубы, а также при неосвещенном поле зрения диск превращается в несколько концентрических дифракционных колец, имеющих форму правильных окружностей. Внешнее кольцо выделяется своей шириной. При отсутствии сферической и хроматической аберрации дифракционные кольца не имеют красноватой окраски и различия в яркости. Существенное различие в яркости внешних и внутренних колец указывает на наличие сферической аберрации. Резкая спектральная окраска колец свидетельствует о наличии хроматической аберрации. Если кольца при вдвинутом или выдвинутом окуляре будут изображаться овалами, то это указывает на наличие астигматизма. При этом обычно большие оси овалов при вдвинутом и выдвинутом окуляре взаимно перпендикулярны. Следует заметить, что иногда причиной астигматизма является дефект глаза наблюдателя. Поворачивая голову около окуляра, а затем окуляр, при неподвижном положении головы, устанавливают действительную причину астигматизма.

Неправильная центровка линз объектива определяется по дифракционному изображению близзенитной звезды, окрашиваемой при вдвинутом окуляре в красный цвет с одной стороны больше, чем с другой. Если эта погрешность значительна, то изображение звезды вытянется в виде спектра.

Если объектив неверно отъюстирован относительно визирной оси трубы, то вместо яркого диска будет видно веерообразное изображение звезды. При вдвигании и выдвигании окуляра изображение звезды вытянется в грушевидное пятно, узкий конец которого будет наиболее светлым.

Если в результате проведенных исследований обнаружатся дефекты оптики, теодолит не следует использовать для выполнения точных астрономических определений. Исправление недостатков может быть осуществлено только в оптической мастерской, имеющей специальные приборы и оборудование.

26. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНЫ ДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ПО СПОСОБУ КОМСТОКА

Основным при исследовании уровней в лабораторных условиях является способ профессора А. С. Васильева, который заключается в применении специального прибора — экзаменатора. Как известно, данный способ наряду с определением цены деления уровня позволяет получить числовые характеристики качества шлифовки и правильности кривизны внутренней поверхности ампулы.

Для исследования уровней в полевых условиях можно с успехом применить способ поворотов алидады теодолита вокруг наклонной вертикальной оси (способ Комстока).

Достоинство способа Комстока состоит в том, что уровень исследуется на самом теодолите, в том же состоянии, в каком он применяется при выполнении астрономических определений. При надлежащей постановке наблюдений точность результатов исследований этим способом будет примерно такая же, как при наблюдениях с помощью экзаменатора.

Для определения цены деления уровня любым способом задают некоторый точно известный угол i , на которой наклоняют ось уровня, и определяют величину перемещения пузырька ω по отсчетам его концов на шкале ампулы. Выразив перемещение пузырька ω в делениях шкалы, можно определить цену τ одного деления по формуле

$$\tau'' = \frac{i''}{\omega^d}.$$

Для точных исследований цены деления и качества шлифовки ампулы угол i выбирается таким, чтобы его можно было последовательно установить несколько раз и наблюдать соответствующие этим установкам перемещения пузырька в пределах всей рабочей части ампулы. При этом средняя цена деления рабочей части шкалы уровня может быть вычислена по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{i''}{\omega_{\text{ср}}^d}. \quad (3.1)$$

При исследованиях на экзаменаторе угол i задается непосредственно с помощью его наводящего винта. При исследованиях по способу Комстока угол i задается путем поворота верхней части теодолита вокруг его вертикальной оси, наклоненной к отвесной линии на угол I . Численное значение угла i является функцией угла наклона вертикальной оси прибора I и угла поворота ΔA верхней части теодолита относительно какого-то начального положения.

Допустим, что вертикальная ось теодолита совмещена с отвесной линией OZ (рис. 60), и исследуемый уровень отъюстирован так, что его ось перпендикулярна к вертикальной оси теодолита.

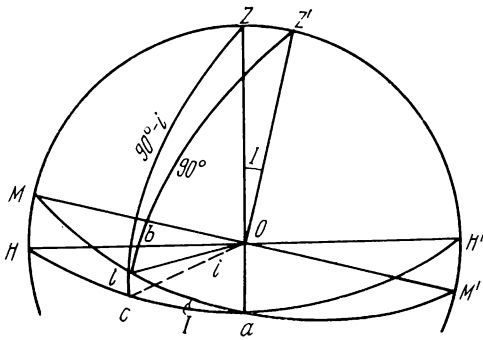


РИС. 60

В этом случае при вращении верхней части теодолита вместе с уровнем ось последнего всегда будет располагаться в горизонтальной плоскости HaH' .

Наклоним вертикальную ось теодолита на угол I . При этом она займет положение OZ' . (Величину угла I можно измерить с помощью вертикального круга исследуемого теодолита). Ось

уровня будет располагаться в плоскости MaM' , наклоненной к плоскости горизонта на угол I .

При вращении верхней части теодолита вокруг наклонной вертикальной оси OZ' можно добиться такого положения, при котором ось уровня совпадет с линией Oa пересечения горизонтальной и наклонной плоскостей. В этом положении ось отъюстированного уровня будет горизонтальна, а его пузырек — на середине.

Если теперь повернуть верхнюю часть теодолита вокруг оси OZ' на угол ΔA , то ось уровня в своем новом положении ob будет наклонена к плоскости горизонта на угол i , который найдется из прямоугольного сферического треугольника abc на основании второго правила Модюи—Непера по формуле

$$\sin i = \sin \Delta A \sin I. \quad (3.2)$$

Угол i при исследованиях измеряется секундами, угол ΔA — минутами, а угол I достигает 1° .

Переходя от синусов малых углов к самим углам, получим

$$\frac{i''}{\rho''} = \frac{\Delta A'}{\rho'} \frac{I^0}{\rho^0}.$$

Подставив значения ρ'' , ρ' и ρ^0 , будем иметь

$$i'' = 1,0472 \cdot I \cdot \Delta A'. \quad (3.3)$$

Поворачивая верхнюю часть теодолита последовательно на один и тот же угол ΔA , на участках, симметричных относительно линии Oa , получим ряд последовательных значений угла наклона оси уровня i ; отсчитывая каждый раз положения концов пузырька уровня, можем вычислить соответствующие величины перемещения пузырька ω . Образовав среднее из них ω_{cp} , по формуле (3.1) можно вычислить цену деления уровня τ .

Если величину перемещения ω выразить не в делениях, а в полуделениях, тогда цена деления уровня вычислится по формуле

$$\tau'' = \frac{2,0944 \cdot I \cdot \Delta A'}{\omega_{cp}^{d/2}}. \quad (3.4)$$

Исследование уровня по способу Комстока выполняется в следующем порядке.

Выбирается хорошо видимая с места постановки теодолита точка на местности или выставляется специальная марка. Теодолит устанавливается на столбе так, чтобы один из его подъемных винтов находился в створе направления на марку с точностью до 2—3°. Прибор тщательно горизонтируется. Чтобы отложить заданный угол наклона I , зрительная труба наводится на марку и отсчитывается вертикальный круг по обим микроскопам. После этого наклон трубы изменяется примерно на 1° и снова отсчитывается вертикальный круг. При этом средняя горизонтальная нить сойдет с марки. Действуя подъемным винтом, в плоскости которого выставлена марка, наводят среднюю горизонтальную нить на марку. Этим самым вертикальная ось наклоняется на угол I . Пузырек исследуемого уровня уйдет под оправу. Далее, вращая верхнюю часть теодолита по азимуту, находят то положение, при котором пузырек уровня окажется в одном из крайних положений рабочей части шкалы, и замечают отсчет A_1 по горизонтальному лимбу.

Медленным вращением верхней части теодолита по азимуту переводят пузырек уровня на другой край рабочей части шкалы и замечают отсчет по кругу A_2 . Дуга A_2 — A_1 горизонтального лимба разбивается на 5—7 равных установок, считая оба крайних положения. При этом желательно, чтобы угол

$$\Delta A = \frac{A_2 - A_1}{n},$$

где n — число перестановок, был выражен в целых минутах.

После этого приступают к непосредственному исследованию уровня. Для этого теодолит устанавливают на отсчет A_1 горизонтального лимба, дают пузырьку успокоиться и отсчитывают по его концам. Далее последовательно переставляют верхнюю часть теодолита на угол $\Delta A'$ и производят соответствующие отсчеты уровня. Заканчивают прямой ход в первом полуприеме при установке верхней части теодолита на отсчет A_2 . Затем в таком же порядке делают обратный ход. На этом заканчивается первый полуприем.

Для выполнения второго полуприема верхняя часть теодолита поворачивается примерно на 180° и вновь определяют соответствующие отсчеты горизонтального лимба A_1 и A_2 . Порядок выполнения исследований во втором полуприеме точно такой же, как и в первом. Заканчивается прием вторичным измерением угла I . Для этого наводят трубу теодолита на марку и отсчитывают вертикальный лимб. После этого тем же подъемным винтом теодолит приводится в нормальное положение и опять тщательно горизонтируется. Труба теодолита вновь наводится на марку и отсчитывается вертикальный лимб. Сходимость углов наклона I_1 , определенного до наблюдений, с I_2 , полученным в конце, в пределах погрешностей измерений гарантирует от возможных просчетов.

Определение цены деления накладного уровня

Астрономический теодолит У5 № 1168

Шкала уровня оцифрована от 0 до 40, подписи слева направо 20 августа 1976 г., 2-й прием

Начало 16^h50^m $t^{\circ} C = +19,1^{\circ}$

Конец 17^h10^m $t^{\circ} C = +19,0^{\circ}$

Измерение угла наклона I вертикальной оси

Положение вертикальной оси	Отсчеты по вертикальному лимбу			I	$\frac{I_{cp}}{I^{\circ}}$
	микроскоп I	микроскоп II	среднее		
Д о и с с л е д о в а н и я					
Вертикальное	89° 25' 18" 19 18,5"	25' 30" 29 29,5"	89° 25' 24,0"	1° 00' 03,5"	
Наклонное	88 25 16 15 15,5	25 25 26 25,5	88 25 20,5		1° 00' 03,8"
П о с л е и с с л е д о в а н и я					
Наклонное	88° 25' 16" 15 15,5"	25' 25" 24 24,5"	88° 25' 20,0"	1° 00' 04,2"	1°,0011
Вертикальное	89 25 20 18 19,0	25 30 29 29,5	89 25 24,2		

Отсчеты по горизонтально- ному кругу	Прямой ход					Обратный ход					Среднее перемещение $\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$
	Отсчеты по уровню		Длина пузырька	Середина пузырька в $d/2$	Переме- щение ω_1	Отсчеты по уровню		Длина пузырька	Середина пузырька в $d/2$	Переме- щение ω_2	
	Л	П				Л	П				

1-й полуприем

88° 35'	6,5 ^д	17,9 ^д	11,4 ^д	24,4 ^{д/2}	7,1 ^{д/2}	6,3 ^д	17,6 ^д	11,3 ^д	23,9 ^{д/2}		
45	10,1	21,4	11,3	31,5	8,1	10,3	21,9	11,3	31,9	8,0 ^{д/2}	7,55 ^{д/2}
55	14,1	25,5	11,4	39,6	8,1	14,4	25,7	11,3	40,1	8,2	8,15
89° 05'	18,2	29,5	11,3	47,7	5,9	18,4	29,7	11,3	48,1	8,0	8,05
15	21,1	32,5	11,4	53,6		21,4	32,7	11,4	54,0	5,9	5,90
										$\Sigma_1 = 29,65$	

2-й полуприем

269° 12'	7,2	18,6	11,4	25,8		7,2	18,5	11,3	25,7		
02	11,0	22,3	11,3	33,3	7,5	11,1	22,4	11,3	33,5	7,8	7,65
268° 52'	15,0	26,5	11,5	41,5	8,2	15,3	26,6	11,3	41,9	8,4	8,30
42	18,9	30,1	11,2	49,0	7,5	19,0	30,2	11,2	49,2	7,3	7,40
32	21,9	33,3	11,4	55,2	6,2	21,1	33,3	11,2	55,4	6,2	6,20
										$\Sigma_2 = 29,55$	
										$\Sigma_{\text{ср}} = 29,60$	
										$\omega_{\text{ср}} = 7,40$	

$$\tau_2'' = \frac{2,0944 \times 1,0011 \times 10}{7,40} = 2,833''.$$

При вычислениях принимается среднее значение угла

$$I = \frac{I_1 + I_2}{2},$$

выраженного в градусах.

Для уверенного определения цены деления уровня необходимо выполнить 4—6 таких приемов.

Исследования необходимо производить при минимальных изменениях температуры и полной защиты теодолита от нагревания солнцем. Лучше такие исследования производить в тихую пасмурную погоду. Целесообразная форма записи результатов наблюдений в журнале, обработка журнала и вычисление цены деления уровня приведены в табл. 4.

Всего было выполнено шесть приемов

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{\sum \tau_i}{n} = 2,818'', \quad M_{\tau} = 0,020'',$$

рассчитывается по формуле

$$M_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n(n-1)}},$$

где δ — уклонение цены деления уровня в каждом приеме от среднего арифметического.

В отношении постоянства кривизны ампулы данный уровень неудовлетворителен в направлении старших отсчетов. При наблюдениях не следует пользоваться частью шкалы за пределами 30 делений.

§ 27. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНЫ ОБОРОТА ОКУЛЯРНОГО (КОНТАКТНОГО) МИКРОМЕТРА ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД В ЭЛОНГАЦИИ.

Вблизи положения элонгации суточная параллель светила практически совпадает с вертикалом (рис. 61), т. е. светило либо поднимается вверх (восточная элонгация), либо опускается вниз (западная элонгация).

Для нахождения положения звезды, наблюдаемой в элонгации, пользуются известными формулами сферической астрономии:

$$s_{WE} = \alpha \pm t, \quad \cos t = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \delta}, \quad \cos z = \frac{\sin \varphi}{\sin \delta},$$

$$A_{WE} = 180^\circ \pm A_N, \quad \sin A_N = \frac{\cos \delta}{\cos \varphi}.$$

Скорость изменения зенитного расстояния

$$\frac{dz}{dt} = \cos \varphi \sin A$$

для светил в положении элонгации постоянна, т. е. равным приращениям часового угла светила соответствуют равные приращения его зенитного расстояния.

Измерив приращение зенитного расстояния светила с помощью окулярного микрометра, а соответствующее ему приращение $\Delta T = T_0 - T_i$ часового угла — по замеченным показаниям хронометра, получим два значения одного и того же приращения зенитного расстояния Δz :

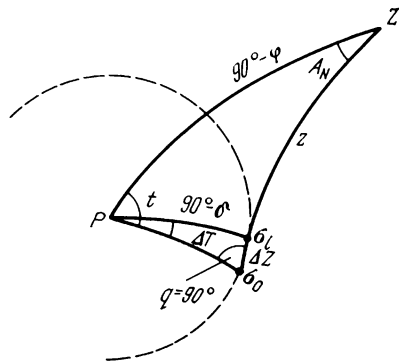


РИС. 61

из непосредственного измерения с помощью окулярного микрометра по формуле

$$\Delta z_{\text{изм}} = R \cdot \Delta M + (i_0 - i_i)^{\delta/2} \frac{\tau}{2} + d\rho, \quad (3.5)$$

где R — цена оборота окулярного (контактного) микрометра; ΔM — разность отсчетов по головке микрометра, выраженная в оборотах, для положений светила σ_i и σ_0 ; $(i_0 - i_i)^{\delta/2} \frac{\tau}{2}$ — поправка за разность наклонов оси талькоттовского уровня, учитывающая возможные изменения положения трубы по высоте за время ΔT ; здесь $i = m - (\text{Л} + \text{П})$ — наклон оси уровня, выраженный в полуделениях; $\frac{\tau}{2}$ — цена полуделения уровня в секундах; $d\rho$ — поправка измеренного приращения зенитного расстояния за влияние дифференциальной рефракции;

из решения прямоугольного сферического треугольника $P\sigma_0\sigma_1$ по измеренному приращению часового угла ΔT

$$\sin \Delta z = \cos \delta \sin \Delta T; \quad (3.6)$$

по малости Δz и ΔT формулу (3.6) можно представить в виде

$$\Delta z - \frac{(\Delta z)^3}{6\rho^2} = 15 \cos \delta \left[\Delta T - \frac{15^2}{6\rho^2} (\Delta T)^3 \right] \quad (3.7)$$

или

$$\Delta z_{\text{выч}} = 15 \cos \delta \left[\Delta T^s - \frac{15^2 \sin^2 \delta}{6\rho^2} (\Delta T)^3 \right].$$

Приравнивая правые части выражений (3.5) и (3.7), получим

$$R \Delta M = 15 \cos \delta \left[\Delta T^s - \frac{15^2 \sin^2 \delta}{6\rho^2} (\Delta T)^3 - \frac{(i_0 - i_i) \tau}{2 \cdot 15 \cos \delta} \right] - d\rho. \quad (3.8)$$

Обозначим

$$\frac{15^2 \sin^2 \delta}{6\rho^2} (\Delta T_i)^3 = c_i, \quad \frac{(i_0 - i_i) \tau}{30 \cos \delta} = \delta_i,$$

$$\delta T_i = \Delta T_i - c_i - \delta_i,$$

$$d\rho = (\rho_0 - \rho_i) = \frac{(M_0 - M_i) R}{60} \Delta\rho',$$

где $\Delta\rho'$ — изменение рефракции при изменении зенитного расстояния на $1'$, выбираемое из таблиц ЗАТ; $\frac{(M_0 - M_i) R}{60} = \frac{\Delta M_i R}{60}$ — приращение $\Delta z'_{\text{изм}}$, выраженное в минутах.

С учетом введенных обозначений из равенства (3.8) получим формулу для вычисления цены оборота в виде

$$R = 15 \cos \delta \frac{\delta T}{\Delta M} - \Delta\rho, \quad (3.9)$$

где

$$\Delta\rho = \frac{R_0}{60} \Delta\rho', \quad R_0 = 15 \cos \delta \frac{\delta T}{\Delta M}.$$

Практически измеряют не одно приращение Δz , а несколько. Для этой цели подвижную нить микрометра ставят в горизонтальное положение. Теодолит устанавливают по вычисленным значениям z и A . С трубой скрепляют талькоттовский уровень и элевационным винтом пузырек уровня выводят на середину. Далее ставят нить микрометра на один из крайних рабочих отсчетов на шкале (гребенке) микрометра: 5,0 или 15,0 в зависимости от того, сверху или снизу идет звезда. При подходе звезды к нити отсчитывают талькоттовский уровень и оценивают методом «глаз—ухо» момент T_i по хронометру прохождения звезды через нить микрометра.

Вслед за этим переставляют подвижную нить микрометра на один целый оборот (или пол-оборота) и наблюдают прохождения звезды таким же образом. Так производят наблюдение звезды на всех n оборотах рабочей части шкалы микрометра. Вычисление приращений часовых углов и соответствующие им измерения приращений зенитных расстояний по отсчетам микрометра относят к положению элонгации. Для этого:

с известной поправкой хронометра u вычисляют момент по хронометру T_0 , соответствующий положению светила в элонгации

$$T_0 = s - u,$$

где s — заранее предвычисленное звездное время в момент элонгации;

подсчитывают для каждого наблюдения промежутки времени от момента элонгации до момента наблюдения звезды

$$\Delta T_i = T_i - T_0,$$

где T_i — показание хронометра в момент прохождения звезды через нить при установке головки на оборот с номером i ; подсчитывают для каждого наблюдения

$$\delta T_i^s = \Delta T_i^s - c_i + \delta_i,$$

где $\delta_i = i^{\partial/2} \frac{\tau}{30 \cos \delta}$ (i_0 в формуле (3.8) принимается равной 0).

Если нуль делений шкалы уровня расположен вблизи объектива, то для восточной элонгации

$$i^{\partial/2} = (\text{Л} + \text{П}) - m,$$

а для западной

$$i^{\partial/2} = m - (\text{Л} + \text{П}).$$

Если нуль делений шкалы уровня расположен вдали от объектива, то знаки наклонов меняются на обратные; величину c_i выбирают из заранее составленных таблиц по аргументам ΔT и δ ; подсчитывают среднее из всех δT_i^s и уклонения отдельных результатов от этого среднего

$$\delta T_0^s = \frac{1}{n} [\delta T_i^s]; \quad \Delta s_i = \delta T_0^s - \delta T_i^s;$$

вычисляют среднее из отсчетов оборотов головки и уклонения от этого среднего

$$M_0 = \frac{1}{n} [M_i]; \quad \Delta M_i = M_0 - M_i.$$

При вычислении со средними значениями δT_0^s и M_0 из всех n наблюдений величины Δs_i соответствуют приращению часовых углов на i -м обороте, а $\Delta M_i R_i = \Delta z_{\text{изм}i}$ — приращению зенитных расстояний на i -м обороте по отношению к M_0 . Поэтому для каждого i -го оборота на основании (3.9) имеем

$$R_i = 15 \cos \delta \frac{\Delta s_i}{\Delta M_i} - \Delta \rho. \quad (3.9')$$

При вычислении величины $R_{0i} = 15 \cos \delta \frac{\Delta s_i}{\Delta M_i}$ полагают, что при одинаковой точности определения приращения часовых углов Δs_i случайная величина погрешности в определении R_{0i} будет тем больше, чем меньше величина ΔM_i . На этом основании цене оборота, вычисленной по формуле (3.9)', приписывают вес $P_i = \Delta M_i^2$. Окончательное значение цены оборота из наблюдений звезды в элонгации на n оборотах винта вычисляют как среднее весовое по формуле

$$R_{\text{ср}} = \frac{[R_i P_i]}{[P_i]} = 15 \cos \delta \frac{[\Delta s_i \Delta M_i]}{[\Delta M_i^2]} - \Delta \rho. \quad (3.10)$$

Пример определения цены оборота из наблюдений в элонгации приведен в табл. 5.

Определение цены оборота винта окулярного микрометра

Астрономический теодолит АУ 2"/10" № 3205 $\tau = 1,74''$

Пункт *Еловка* $\varphi = 56^\circ 03' 37''$ $u = -0^m 28,9^s$ в момент $X = 17^h 30,8^m$

Звезда 36 *H* *Serpe* $m = 5,0$ $\alpha = 22^h 55^m 01,3^s$ $\delta = 84^\circ 06' 15,7''$

Элонгация восточная; $i = (Л + П) - 30$; $\cos \delta = 0,10271$; $\frac{\tau}{30 \cos \delta} = 0,565''$

Вычисление эфемерид * и момента элонгации

$\operatorname{tg} \varphi$	1,48 593	$\sin \varphi$	0,82 963	$\cos \delta$	0,10 271
$\operatorname{tg} \delta$	9,68 443	$\sin \delta$	0,99 470	$\cos \varphi$	0,55 832
$\cos t$	0,15 344	$\cos z$	083 405	$\sin A_N$	0,18 396
t^h	$5^h 24^m 41,7^s$	z	$33^\circ 29'$	A_N	$10^\circ 37'$
α	22 55 01,3				
s	17 30 19,6				
u	— 0 28,9				
T_0	17 30 48,5				

* В табл.1АТ даны эфемериды 20 звезд в элонгации для определения цены оборота барабана окулярного микрометра в широтах от $+30^\circ$ до $+70^\circ$.

Наблюдения и их обработка
 $T_0 = 17^{\circ} 30^m 48,5^s$

Обороты	T	Уровень	i	ΔT_i	c_i	δ_i	δT_i^s	ΔM_i	Δs_i
5,0 ⁰⁶	17 ^h 25 ^m 19,0 ^s	5,2—27,6	+2,8	-5 ^m 29,5 ^s	+0,03 ^s	+1,58 ^s	-327,89 ^s	+5,0 ⁰⁶	+366,84 ^s
6,0	26 32,5	5,0 27,4	+2,4	-4 16,0	+0,01	+1,36	-254,63	+4,0	+293,58
7,0	27 45,5	5,1 27,5	+2,6	-3 03,0	—	+1,47	-181,53	+3,0	+220,48
8,0	28 58,5	5,8 28,1	+3,9	-1 50,0	—	+2,20	-107,70	+2,0	+146,75
9,0	30 12,0	6,0 28,4	+4,4	-0 36,5	—	+2,49	- 34,01	+1,0	+72,96
10,0	31 25,0	6,0 28,4	+4,4	+0 36,5	—	+2,49	+ 38,99	0	-0,04
11,0	32 38,0	6,0 28,5	+4,5	+1 49,5	—	+2,54	+112,04	-1,0	-73,09
12,0	33 52,0	6,2—28,7	+4,9	+3 03,5	—	+2,77	+186,27	-2,0	-147,32
13,0	35 05,0	5,8—28,3	+4,1	+4 16,5	-0,01	+2,32	+258,81	-3,0	-219,86
14,0	36 18,0	5,9—28,4	+4,3	+5 29,5	-0,03	+2,43	+331,90	-4,0	-392,95
15,0	37 32,0	6,2—28,8	+5,0	+6 43,5	-0,05	+2,82	+406,27	-5,0	-367,32

$$M_0 = 10,0$$

$$\delta T_0^s = +38,95^s$$

$$0,0+0,03$$

$$[\Delta M \Delta s] = 8072,13$$

$$[\Delta M^2] = 110$$

$$15 \cos \delta = 1,54065$$

$$R_{0cp} = 15 \cos \delta \frac{[\Delta M \Delta s]}{[\Delta M^2]} = \frac{1,54065 \cdot 8072,23}{110} = 113,06''$$

$$\Delta \rho' = 0,0252'' \quad \Delta \rho = \frac{R_0 \Delta \rho'}{60} = \frac{113,06 \cdot 0,0252}{60} = 0,048''$$

$$R = R_0 - \Delta \rho = 113,06'' - 0,05 = 113,01''$$

**§ 28. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНЫ ОБОРОТА
ОКУЛЯРНОГО КОНТАКТНОГО) МИКРОМЕТРА
ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД В МЕРИДИАНЕ**

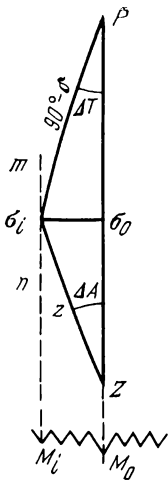


РИС. 62

Этот способ исследования обычно применяется для определения цены оборота контактного микрометра пассажного инструмента. Для определения цены оборота микрометра астрономического теодолита он применяется реже, чем способ из наблюдений звезд в элонгации. Это объясняется тем, что при наблюдениях звезд в элонгации контроль за поведением трубы по высоте осуществляется надежно с помощью талькоттовского уровня, тогда как при наблюдениях звезд в меридиане контроль за поведением трубы теодолита по азимуту осуществить довольно трудно.

Для наблюдений теодолит устанавливается на прочном основании, тщательно горизонтируется. Коробка микрометра поворачивается так, чтобы подвижная нить заняла вертикальное положение. Для определения цены оборота выбираются северные звезды со склонением от $+65$ до $+83^\circ$.

Измерив приращение азимута светила ΔA с помощью подвижной нити m окулярного микрометра (рис. 62), а соответствующее ему приращение ΔT часового угла — по наблюдаемым показаниям хронометра, получим два значения одного и того же приращения азимута ΔA :

из непосредственного измерения с помощью окулярного микрометра по формуле

$$\Delta A = R_0 \Delta M, \quad (3.11)$$

где $\Delta M = M_0 - M_i$ — разность отсчетов по головке микрометра, выраженная в оборотах, для положений светила σ_0 и σ_i ;

из решения прямоугольного сферического треугольника по измеренному приращению часового угла $\Delta T_i = T_i - T_0$

$$\sin \Delta A = \cos \delta \sin \Delta T;$$

по малости ΔA и ΔT эту формулу по аналогии с 3.7 можно представить в виде

$$\Delta A = 15 \cos \delta \left[\Delta T^s - \frac{15^2 \sin^2 \delta}{60^2} (\Delta T)^3 \right] = 15 \cos \delta (\Delta T^s - c). \quad (3.12)$$

Полагая $\Delta T^s - c = \delta T^s$ и приравнивая правые части выражений (3.11) и (3.12), получим

$$R_{0i} = 15 \cos \delta \frac{\delta T_i^s}{\Delta M_i} \quad \text{с весом } P_i = \Delta M_i^2. \quad (3.13)$$

Измеряют несколько приращений ΔA на протяжении 10—12 оборотов микрометра с перестановкой подвижной нити через пол-оборота или оборот и наблюдают соответствующие моменты T_i прохождения звезды через нить. Обработку всей совокупности наблюдений выполняют принципиально в той же последовательности, как и при наблюдениях в элонгации, т. е.:

с известной поправкой хронометра u вычисляют момент по хронометру T_0 прохождения звезды через меридиан; звездное время прохождения звезды через меридиан определяется следующими равенствами:

$$s = \alpha \text{ — для верхней кульминации,}$$

$$s = \alpha \pm 12^h \text{ — для нижней кульминации,}$$

так как $s = T_0 + u$, то $T_0 = \alpha - u$ для звезды в верхней кульминации,

$T_0 = \alpha \pm 12 - u$ для звезды в нижней кульминации; вычисляют разности:

$$\Delta T_i = T_i - T_0, \quad \delta T_i^s = \Delta T_i - c;$$

подсчитывают среднее из всех δT_i^s и уклонения отдельных результатов от этого среднего

$$\delta T_0^s = \frac{1}{n} [\delta T_i^s], \quad \Delta s_i = \delta T_0^s - \delta T_i^s;$$

вычисляют среднее из отсчетов оборотов головки микрометра и уклонения от этого среднего

$$M_0 = \frac{1}{n} [M_i], \quad \Delta M_i = M_0 - M_i;$$

значение цены оборота R_0 из наблюдений звезды в меридиане на n оборотах винта вычисляют как среднее весовое по формуле

$$R_0 = \frac{[P_i R_i]}{[P_i]} = 15 \cos \delta \frac{[\Delta s_i \Delta M_i]}{\Delta M_i^2}; \quad (3.14)$$

полученное значение R_0 нужно исправить поправкой за влияние рефракции (рефракция уменьшает зенитные расстояния светил, вследствие чего видимые значения приращений ΔA будут несколько больше истинных); приведем без доказательства окончательную формулу для вычисления цены оборота

$$R = R_0 - \Delta \rho, \quad (3.15)$$

где

$$\Delta \rho = \frac{R_0}{3600}.$$

Пример определения цены оборота окулярного микрометра из наблюдений звезды в меридиане приведен в табл. 6.

**Определение цены оборота контактного микрометра
из наблюдений звезды в меридиане**

Астрономический теодолит АУ 2'/10' № 3213

Пункт *Гороховский*Звезда ξ Umi $\alpha = 15^{\text{h}}45^{\text{m}}58,98^{\text{s}}$ $\delta = 77^{\circ} 57' 17,86''$ $u = +1^{\text{m}}09,60^{\text{s}}$ $T_0 = 15^{\text{h}}44^{\text{m}}49,38^{\text{s}}$ $\cos \delta = 0,208680$ $15 \cos \delta = 3,130 200$

Обороты	T_i	ΔT_i	c_i	δT_i	ΔM	Δs
15	15 ^h 42 ^m 03,0 ^s	-2 ^m 46,38 ^s	0	-166,38 ^s	+5 ^o 6	+157,96 ^s
14	42 34,0	-2 15,38	0	-135,38	+4	+126,96
13	43 05,5	-1 43,88	0	-103,88	+3	+95,46
12	43 37,0	-1 12,38	0	-72,38	+2	+63,96
11	44 10,0	-0 39,38	0	-39,39	+1	+30,96
10	44 41,0	-0 08,38	0	-8,38	0	-0,04
9	45 13,0	+0 23,62	0	+23,62	-1	-32,04
8	45 44,0	+0 54,62	0	+54,62	-2	-63,04
7	46 16,0	+1 26,62	0	+86,62	-3	-95,04
6	46 48,0	+1 58,62	0	+118,63	-4	-127,04
5	47 19,0	+2 29,62	0	+149,62	-5	-158,04

 $M_0 = 10,00$ $\delta T_0 = -8,42^{\text{s}}$ 0 $+0,06$ $[\Delta M^2] = 110$ $[\Delta M \Delta s] = 3484,50$

$$R = 3,130 200 \frac{3484,50}{110} - 0,028'' = 99,128''$$

**§ 29. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ БОКОВЫХ НИТЕЙ
ОТ СРЕДНЕЙ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД В МЕРИДИАНЕ .**

Для определения расстояний между нитями из наблюдений звезд в меридиане постоянные нити сетки поворотом коробки микрометра устанавливают в вертикальное положение. Теодолит ориентируется в меридиане. Для исследования выбирают северные звезды со склонением $\varphi < \delta < +80^{\circ}$, пользуясь каталогом средних мест звезд АЕ. Рабочие эфемериды звезд для наблюдений в меридиане вычисляются по известным формулам сферической астрономии:

$$\left. \begin{array}{l} s = \alpha \\ z = \delta - \varphi \\ A_N = 0^{\circ} \end{array} \right\} \text{— для звезд в верхней кульминации;}$$

$$\left. \begin{array}{l} s = \alpha \pm 12^{\text{h}} \\ z = 180^{\circ} - (\varphi + \delta) \\ A_N = 0 \end{array} \right\} \text{— для звезд в нижней кульминации.}$$

Наблюдения прохождений звезд через вертикальные нити сетки выполняются следующим образом:

за 3—4 мин до момента кульминации устанавливают трубу при КЛ (окуляр W) на зенитное расстояние звезды, выбранное из эфемерид; отсчет по ориентированному горизонтальному кругу должен быть равен 0° (при ориентировании диаметра $0—180^\circ$ нулем на Север);

при вступлении звезды в поле зрения трубы подправляют наводящим винтом установку трубы по зенитному расстоянию так, чтобы изображение звезды перемещалось вблизи (или внутри) нитей горизонтального биссектора;

наблюдают и записывают моменты T_i по хронометру, соответствующие пересечениям звездой каждой нити.

Для вычислений расстояний f_i боковых нитей от средней (рис. 63) образуют разности

$$\Delta T_i = T_i - T_0,$$

где T_i — момент по хронометру прохождения звезды через i -ю боковую нить, T_0 — момент прохождения звезды через среднюю нить.

В некоторых способах астрономических определений требуется знать расстояния боковых нитей не от средней действительной нити, а от средней фиктивной нити. Момент прохождения через среднюю фиктивную нить вычисляется по формуле

$$T'_0 = \frac{\sum T_i}{n}.$$

Для установления нумераций нитей принято условно считать первой нитью ту, на которую при положении прибора «окуляр W » звезда в верхней кульминации вступает раньше, чем на прочие.

Для вычисления расстояний f_i применяется формула, вытекающая из прямоугольного треугольника $P\sigma_i\sigma_0$ (см. рис. 63).

$$\sin f_i = \cos \delta \sin \Delta T_i;$$

по малости f_i и ΔT_i можно положить

$$f_i'' = 15 \cos \delta \left[\Delta T_i - \frac{15^2 \sin^2 \delta}{6\rho^2} (\Delta T)^3 \right] = 15 \cos \delta [\Delta T_i - c_i].$$

(3.16)

Второй член формулы (3.16) учитывается в случае, когда $\Delta T_i > 400^s$.

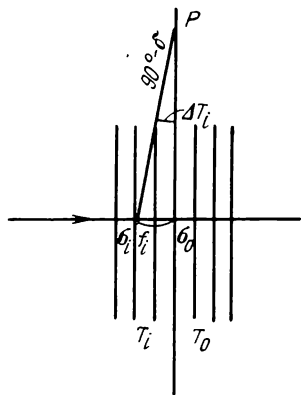


РИС. 63

**Определение расстояний боковых нитей
от средней из наблюдений звезд в меридиане**

Пункт *Гороховский* 9 октября 1976 г.

Теодолит АУ 2"/10" № 3213

Звезда α Camelopardalis $\delta = +66^\circ 14,1'$ $\cos \delta = 0,4030$

$15 \cos \delta = 6,0450$

Вычисление расстояний от средней действительной нити *

Номер нити	T_i	ΔT_i	f_i
1	$4^h46^m04,7^s$	$-38,6^s$	$-233,3''$
2	23,5	$-19,8$	$-119,7$
3	32,6	$-10,7$	$-64,7$
4	43,3	—	—
5	54,2	$+10,9$	$+65,9$
6	47 04,0	$+20,7$	$+125,1$
7	23,7	$+40,4$	$+244,3$

Вычисление расстояний от средней фиктивной нити

Номер нити	T_i	$\Delta T'_i$	f'_i
1	$4^h46^m04,7^s$	$-39,01^s$	$-235,8''$
2	23,5	$-20,21$	$-122,2$
3	32,6	$-11,11$	$-67,2$
4	43,3	$-0,41$	$-2,5$
5	54,2	$+10,49$	$+63,4$
6	47 04,0	$+20,29$	$+122,6$
7	23,7	$+39,99$	$+241,7$

$$T'_0 = 4^h46^m43,71^s$$

* Знаки расстояний поставлены условно.

Для надежности определения расстояний боковых нитей от средней (или от средней фиктивной) требуется провести наблюдения не менее 6—8 звезд. Средняя квадратическая погрешность выведенного результата для каждой нити не должна превышать $0,3^s$.

Пример определения расстояния боковых нитей от средней действительной и от средней фиктивной нити приведен в табл. 7.

**§ 30. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕРТВОГО ХОДА ВИНТА
И ШИРИНЫ КОНТАКТОВ ГОЛОВКИ
КОНТАКТНОГО МИКРОМЕТРА**

При наблюдениях прохождений звезд с контактным микрометром приходится работать его винтом как на ввинчивание, так и на вывинчивание. При этом замыкание или размыкание цепи

контактного микрометра будет производиться то одним краем контакта, то другим. Для согласования моментов контактирования при ввинчивании или вывинчивании винта их относят к середине контакта путем введения поправки за половину ширины контакта. Кроме того, при наличии мертвого хода винта контактная головка придет в движение раньше, чем укрепленная на рамке подвижная нить микрометра, и поэтому контакт опережает момент, который получился бы при отсутствии мертвого хода. При работе на ввинчивание и вывинчивание винта микрометра в этом случае необходимо также ввести поправку за половину мертвого хода винта.

Для введения поправок за мертвый ход и ширину контактов их численные значения находятся из специальных исследований. Так как величина мертвого хода и ширина контактов могут меняться со временем вследствие изменения температуры, то инструкция требует производить определение ширины контактов на каждом полевом пункте, а определение мертвого хода — в каждый вечер наблюдений.

Для определения мертвого хода винта контактного микрометра подвижную нить наводят на координатные или ограничительные нити вращением наводящего винта вначале на ввинчивание, а затем на вывинчивание с соответствующими отсчетами по шкале микрометра. Разность отсчетов «ввинчивание минус вывинчивание» определяет величину и знак мертвого хода M_x , выраженную в делениях или в долях оборота. Умножив результат на цену деления шкалы μ или на цену оборота R , получают величину мертвого хода в градусной мере.

Мертвый ход винта находят из десятикратного определения его значения при использовании первой, а затем второй пары координатных нитей; среднее из полученных результатов дает окончательное его значение. По такой программе мертвый ход определяют в каждый вечер наблюдений. В лабораторных условиях до выезда на полевые работы мертвый ход определяют по расширенной программе при двух положениях вертикального круга на зенитных расстояниях 0 , 45 и 90° . Если при таких исследованиях выявятся изменения величины мертвого хода, превышающие 0 , 1° , то контактный микрометр необходимо передать механику для исправления. Само значение мертвого хода не должно превышать $0,5^\circ$ деления шкалы.

Пример определения мертвого хода винта приведен в табл. 8.

Для определения ширины контактов в электрическую цепь контактного микрометра параллельно ей включают конденсатор с телефоном. Питание цепи осуществляется от одного элемента с напряжением $1,5$ В. При замыкании и размыкании электрической цепи в телефоне будет слышен щелчок.

При медленном вращении наводящего винта слушают щелчки, соответствующие замыканиям и размыканиям цепи каждым кон-

Определение мертвого хода винта контактного микрометра

Теодолит АУ 2"/10" № 3213 $R = 114,02''$ 2 сентября 1976 г. $t_c^0 = +13,2^\circ$

Номер наведения	Прямой ход			Обратный ход		
	Ввинчивание	Вывинчивание	Мх	Ввинчивание	Вывинчивание	Мх
1	13,5 ^d	13,3 ^d	+0,2 ^d	68,5 ^d	68,7 ^d	-0,2 ^d
2	13,0	13,3	-0,3	69,3	69,5	-0,2
3	12,9	13,0	-0,1	68,2	69,3	-0,1
4	13,1	13,2	-0,1	68,4	68,4	0,0
5	12,8	13,0	-0,2	69,1	69,2	-0,1
6	13,5	13,8	-0,3	68,8	69,0	-0,2
7	13,1	13,3	-0,2	67,5	67,8	-0,3
8	13,5	13,3	+0,2	69,3	69,4	-0,1
9	13,0	13,0	0,0	70,4	70,6	-0,2
10	13,1	13,3	-0,2	68,3	68,5	-0,3

Мх = -0,10

Мх = -0,16

$$M_{xcp} = -0,13^d = -0,0013^{ob}$$

$$M_{xcp} = M_x^{ob} R = -0,0013 \cdot 114,02 = -0,148''$$

Т а б л и ц а 9

Определение ширины контактов

Инструмент АУ 2"/10" № 3213 $R = 114,02''$ 2 сентября 1976 г. $t_c^0 = +13,0^\circ$

Номер контакта	Прямой ход			Обратный ход			Средняя ширина контактов
	замыкание	размыкание	Шк	замыкание	размыкание	Шк	
1	8,0 ^d	9,8 ^d	1,8 ^d	9,6 ^d	7,9 ^d	1,7 ^d	1,75 ^d
2	28,0	29,7	1,7	29,6	28,0	1,6	1,65
3	48,0	49,7	1,7	48,6	48,0	1,6	1,65
4	68,0	69,8	1,8	69,7	68,0	1,7	1,75
5	97,0	99,8	1,9	99,7	98,0	1,7	1,80

Средн. 1,72^d

$$Шк^{ob} = 0,0172^{ob}$$

$$Шк = 0,0172 \cdot 114,02 = 1,961''$$

тактом микрометра. При этом записывают отсчеты по шкале.

Разность отсчетов «замыкание минус размыкание» дает ширину каждого контакта в делениях шкалы или в оборотах. Исследование производится сначала в прямом направлении (на ввинчивание), а затем в обратном (на вывинчивание).

Окончательное значение ширины контакта получается как среднее арифметическое из всех определений. Для выражения ширины контакта в секундах дуги или времени значение средней ширины контактов в делениях (или оборотах) умножают на соответствующее значение цены деления (оборота).

Пример определения средней ширины контактов приведен в табл. 9.

РАЗДЕЛ II

ЗЕНИТАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Г Л А В А 4

ИЗМЕРЕНИЕ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ СВЕТИЛ

§ 31. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ СВЕТИЛ

В зенитальных способах астрономических определений величинами, подлежащими измерению, являются зенитные расстояния светил.

Особенности измерения зенитных расстояний светил состоят в том, что светила непрерывно меняют свое видимое положение в пространстве с течением времени. Поэтому измерение зенитных расстояний светил, как правило, необходимо производить в определенной системе счета времени. Вследствие этого процесс визирования на светило в общем случае связан с отсчетами показаний хронометра в моменты наведения горизонтальной нити на светило или в моменты прохождения светила через горизонтальные нити установленной неподвижно по высоте трубы прибора.

Визирование методом наведения горизонтальной нити на светило под счет ударов хронометра целесообразно применять лишь в тех случаях, когда скорость изменения зенитного расстояния светила близка к нулю. В южных и средних широтах это соответствует положению светил в меридиане и вблизи него. В высоких широтах, где углы между суточными параллелями светил и кругами равных высот малы, пределы применения метода наведений значительно расширяются.

Визирование методом наблюдения прохождений светил через горизонтальные нити установленной неподвижно по высоте трубы прибора необходимо применять во всех случаях, когда скорость изменения зенитного расстояния светила достаточно велика. Для ослабления влияния личных погрешностей наблюдателя, характерных для метода «глаз—ухо», при точных астрономических определениях наблюдение «прохождений» осуществляется с помощью контактного микрометра (полуавтоматический метод визирования) или фотоэлектрической регистрации звездных прохождений (автоматический метод визирования). Кроме особенностей, связанных с методом визирования, при измерении зенитных расстояний светил для введения

поправок за астрономическую рефракцию учитывают влияние внешних условий наблюдений: температуру, давление, влажность воздуха.

Наблюдения светил производят на всевозможных зенитных расстояниях, вследствие чего необходимо учитывать или исключать целесообразно построенной программой наблюдений влияние различных приборных источников погрешностей, действующих на результаты измерений в функции зенитных расстояний наблюдаемых светил.

Прежде чем приступить к изучению перечисленных погрешностей, рассмотрим общие основные правила и формулы, применяемые при измерении зенитных расстояний светил.

В астрономических теодолитах, применяемых для точных астрономических наблюдений, вертикальный круг вращается вместе с трубой и, как правило, имеет подписи делений, возрастающие по ходу часовой стрелки. Микроскопы вертикального круга крепятся в обоймах неподвижной рамы, на которую устанавливается также и накладной уровень.

Назовем местом зенита и обозначим через Mz отсчет на вертикальном круге, при котором визирная ось трубы направлена точно в зенит (т. е. когда визирная ось совпадает с отвесной линией) и когда пузырек уровня накладного на раму микроскопов вертикального круга находится на середине. Очевидно, отсчет Mz остается одним и тем же для наблюдений как при круге лево (КЛ), так и при круге право (КП).

Если при круге лево вращать трубу в направлении увеличения зенитного расстояния, то при возрастающих по часовой стрелке подписях делений отсчеты по вертикальному лимбу будут также возрастать. Для круга право будем наблюдать обратное явление, т. е. при возрастании зенитного расстояния трубы отсчеты по вертикальному лимбу будут убывать. Зенитное расстояние z' любого предмета, как вертикальный угол, отсчитываемый от направления в зенит до направления на предмет, будет равно разности соответствующих отсчетов по вертикальному лимбу. Обозначив отсчет при визировании на предмет для круга лево через L , а для круга право — через R , получим

$$\left. \begin{aligned} z' &= L - Mz; \\ z' &= Mz - R. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Из формул (4.1) следует

$$z' = \frac{L - R}{2} \quad (4.2)$$

и

$$Mz = \frac{L + R}{2}. \quad (4.3)$$

Если подписи делений вертикального лимба возрастают против хода часовой стрелки, то формулы для вычисления z' имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} z' &= R - Mz; \\ z' &= Mz - L, \end{aligned} \right\} \quad (4.1')$$

$$z' = \frac{R - L}{2}, \quad (4.2')$$

$$Mz = \frac{L + R}{2}. \quad (4.3')$$

Отсчеты по вертикальному лимбу берут обычно по обоим микроскопам с наведением на младший и старший штрихи. Затем образуют средний отсчет, который исправляют поправкой за наклон оси уровня при алидаде вертикального круга. При точных астрономических определениях уровень обычно не приводят на середину, так как это нарушает равновесие частей теодолита, полученное ими во время наблюдения светила, а положение пузырька уровня отмечают по отсчетам его концов и затем исправляют полученный отсчет по лимбу за наклон оси уровня.

Если через L' и R' обозначить снятые с лимба отсчеты, а через i — поправку за наклон оси уровня, то исправленные отсчеты будут

$$L = L' + i; \quad R = R' + i. \quad (4.4)$$

Под наклоном оси уровня понимается угол i , составленный осью уровня в момент наблюдений с тем ее направлением, которое она занимала бы при положении пузырька уровня точно на середине. Очевидно, величина этого угла определяется величиной смещения середины пузырька уровня относительно нуля-пункта (рис. 64).

Если шкала уровня оцифрована так, что на одном конце подписан нуль, а на другом — число делений, равное m (середина

$\frac{m}{2}$), то наклонность оси уровня в делениях выразится так:

$$i^{\partial} = \frac{\text{Л} + \text{П}}{2} - \frac{m}{2} - \frac{1}{2} \times \\ \times [(\text{Л} + \text{П}) - m], \quad (4.5)$$

где Л и П — отсчеты по левому и правому концам

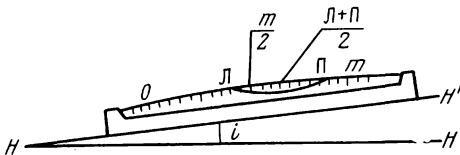


РИС. 64

пузырька при условии, что наблюдатель стоит лицом к уровню, с той же стороны, где находится вертикальный круг.

Этот же наклон, выраженный в полуделениях и в секундах дуги, будет соответственно:

$$i^{d/2} = [(\Pi + \Pi) - m] \quad (4.6)$$

$$i'' = [(\Pi + \Pi) - m] \frac{\tau''}{2}, \quad (4.7)$$

где $\frac{\tau''}{2}$ — цена одного полуделения, выраженная в секундах.

Если шкала уровня оцифрована так, что в середине помещен нуль, а надписи делений возрастают в обе стороны, то наклон (в секундах) будет

$$i = (\Pi + \Pi) \frac{\tau}{2}. \quad (4.8)$$

Знак поправки за наклон оси уровня определяется направлением возрастания подписей делений на лимбе и положением нуля (младшего деления) на шкале уровня. При возрастании подписей делений лимба по ходу часовой стрелки левому концу пузырька приписывают знак «—», а правому «+».

Действительно, пусть при положении пузырька уровня в середине отсчет на лимбе будет L (рис. 65, а): если пузырек уровня ушел вправо (рис. 65, б), то это указывает на перемещение алидады (линии, соединяющей нуль-пункты микроскопов-микрометров) вертикального круга в сторону уменьшения отсчета по лимбу. Поэтому для получения правильного отсчета L нужно снятый с лимба отсчет L' увеличить на угол i , т. е.

$$L = L' + i.$$

Угол i будет положительным только в том случае, если отсчету по правому концу пузырька придать знак «+», а по левому — знак «—». Если в данном же случае, т. е. при возрастании подписи делений лимба по часовой стрелке, шкала уровня оцифрована так, что на левом конце подписан 0, а на правом m , то поправка

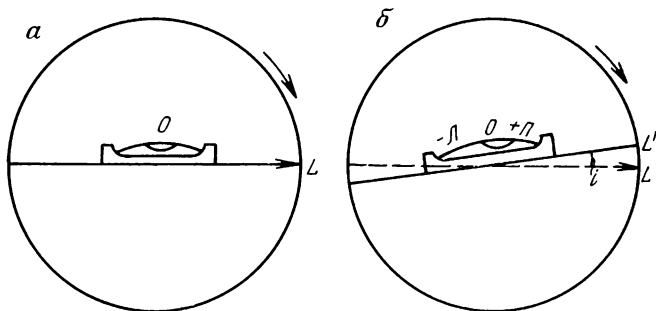


РИС. 65

за наклон вычислится по формуле (4.7). Если же на левом конце шкалы будет подпись m , а на правом 0, то поправка за наклон оси уровня вычислится по формуле

$$i = [m - (\text{Л} + \text{П})] \frac{\tau''}{2}. \quad (4.9)$$

Для случая, когда на левом конце шкалы написано число m_1 , а на правом m_2 , причем $m_2 > m_1$, поправка за наклон определится формулой

$$i = [(\text{Л} + \text{П}) - (m_1 + m_2)] \frac{\tau''}{2}; \quad (4.10)$$

если же $m_1 > m_2$, поправка за наклон будет

$$i = [(m_1 + m_2) - (\text{Л} + \text{П})] \frac{\tau''}{2}. \quad (4.11)$$

Так как положение светил непрерывно меняется вследствие видимого суточного вращения небесной сферы, то при нахождении их зенитных расстояний обычно пользуются формулами (4.1). При этом методы наблюдений и вычислений строят таким образом, чтобы в окончательном результате определения широты или времени исключилось влияние погрешности в принятом значении M_z .

Формулой (4.2) при вычислениях зенитных расстояний светил пользуются реже; при этом зенитное расстояние, исправленное поправкой за ускорение движения светила, будет соответствовать среднему моменту наблюдений светила, выполненных при обоих положениях вертикального круга теодолита.

Для ослабления влияния случайной погрешности визирования на светило методом наведения горизонтальной нити под счет ударов хронометра целесообразно производить многократное визирование с помощью подвижной нити окулярного микрометра трубы. В этом случае отсчет по вертикальному лимбу необходимо исправить поправкой за окулярный микрометр.

Если через L_0 и R_0 обозначить отсчеты по лимбу, а через L' и R' — отсчеты с поправкой за микрометр, то

$$\left. \begin{aligned} L' &= L_0 \pm (M_L - 10^{06})R; \\ R' &= R_0 \pm (M_R - 10^{06})R, \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

где M_L и M_R — отсчеты по головке окулярного микрометра, выраженные в оборотах и их долях; 10^{06} — условный отсчет для нуль-пункта гребенки микрометра; R — цена оборота окулярного микрометра.

Поправка за микрометр прибавляется или вычитается в зависимости от того, возрастают или убывают отсчеты по микрометру с увеличением зенитного расстояния.

Для учета влияния астрономической рефракции во время наблюдений периодически измеряются температура воздуха и атмосферное давление. Зенитное расстояние светила, исправленное поправкой за рефракцию, будет

$$z = z' + \rho. \quad (4.13)$$

Ввиду возможных больших погрешностей таблиц рефракции вблизи горизонта зенитные расстояния светил, превышающие $70-75^\circ$, не измеряются, а в точных способах астрономических определений наблюдать светила на зенитных расстояниях, превышающих $50-60^\circ$, не рекомендуется.

§ 32. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ СВЕТИЛ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЛИЯНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Исследование влияния инструментальных (приборных) погрешностей на измеряемые зенитные расстояния светил представляет собой одну из важных проблем практической астрономии.

В данном параграфе мы рассмотрим очень кратко лишь некоторые основные погрешности, имеющие систематический характер и действующие на результаты измерений в функции зенитных расстояний наблюдаемых светил. К этим погрешностям можно отнести: наклон горизонтальной оси; коллимационную ошибку; систематические и случайные погрешности делений вертикального круга; «гнутие» трубы прибора.

1. Влияние наклона горизонтальной оси и коллимационной ошибки на измеряемое зенитное расстояние

Если ось вращения трубы $H'H'$ (рис. 66) наклонена к горизонту HN на малый угол b , то перпендикулярная к ней оптическая ось трубы опишет на небесной сфере вместо вертикала, перпендикулярного к плоскости чертежа, большой круг $Z'L$, высшая точка которого находится от истинного зенита Z на расстоянии $ZZ' = b$. Если же визирная ось неперпендикулярна к оси вращения трубы и составляет с одним из ее концов угол $90^\circ - c$, а с другим $90^\circ + c$, то в этом случае визирная ось опишет на небесной сфере малый круг $O'\sigma$, параллельный большому кругу $Z'L'$ и отстоящий от последнего на угловую величину, равную коллимационной ошибке c .

При визировании из-за коллимационной ошибки светило σ будет одновременно находиться на малом круге $O'\sigma$ и на большом

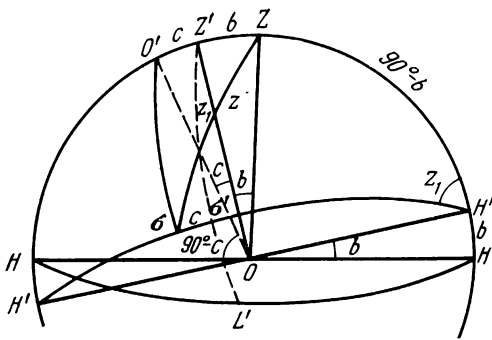


РИС. 66

круге $H'\sigma H'$, который представляет собой проекцию горизонтальной нити, параллельной оси вращения трубы, на небесную сферу.

Истинное зенитное расстояние светила в момент визирования равно $z = Z\sigma$, а при наличии погрешностей b и c , будет измерено зенитное расстояние $z_1 = Z'\sigma'$. Погрешность в измеренном зенитном расстоянии, обусловленная влиянием наклона горизонтальной оси и коллимационной ошибкой, будет

$$\Delta z = z - z_1.$$

Для нахождения этой величины решим сферический треугольник $Z\sigma H'$, в котором стороны равны соответственно $Z\sigma = z$, $ZH' = 90 - b$, $H'\sigma = 90^\circ + c$, а сферический угол $ZH'\sigma$ численно равен дуге полярности

$$Z'\sigma' = z_1.$$

По формуле косинуса стороны имеем

$$\cos z = -\sin b \sin c + \cos b \cos c \cos z_1.$$

Разложив синусы и косинусы малых величин b и c в ряд и ограничившись членами второго порядка, получим

$$\begin{aligned} \cos z &= -\frac{b''c''}{\rho''^2} + \left(1 - \frac{b''^2}{2\rho''^2}\right)\left(1 - \frac{c''^2}{2\rho''^2}\right)\cos z_1 = \\ &= -\frac{b''c''}{\rho''^2} + \cos z_1 - \frac{b''^2}{2\rho''^2}\cos z_1 - \frac{c''^2}{2\rho''^2}\cos z_1 + \frac{(b''c'')^2}{4\rho''^4}\cos z_1. \end{aligned}$$

Пренебрегая по малости последним членом, будем иметь

$$\left. \begin{aligned} \cos z_1 - \cos z &= \frac{b''c''}{\rho''^2} + \frac{b''^2 + c''^2}{2\rho''^2}\cos z_1; \\ 2 \sin \frac{z_1 + z}{2} \sin \frac{z - z_1}{2} &= \frac{b''c''}{\rho''^2} + \frac{b''^2 + c''^2}{2\rho''^2}\cos z_1. \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

При малых значениях b и c значения z и z_1 близки друг к другу, и поэтому можно положить

$$\sin \frac{z - z_1}{2} = \frac{(z - z_1)''}{2\rho''}; \quad \sin \frac{z + z_1}{2} \approx \sin z_1. \quad (4.15)$$

Подставив (4.15) в (4.14), после несложных преобразований получим

$$\Delta z = (z - z_1)'' = \frac{b''c''}{\rho''} \operatorname{cosec} z_1 + \frac{b''^2 + c''^2}{2\rho''} \operatorname{ctg} z_1. \quad (4.16)$$

Из формулы (4.16) следует, что влияние наклона горизонтальной оси и коллимационной ошибки на измеренное зенитное расстояние выражается членами второго порядка и поэтому оно для выверенного прибора всегда мало и может быть заметным лишь при малых зенитных расстояниях, для которых $\operatorname{cosec} z$ и $\operatorname{ctg} z$ достаточно велики.

Полагая предельные значения b и c равными $b = 60''$ и $c = 60''$, получим [на основании формулы (4.16)] для малых зенитных расстояний следующие значения:

Зенитное расстояние z_0	Погрешность $\Delta z = (z - z_1)''$
1°	2''
5	0,4
10	0,2
15	0,1

Таким образом, для исключения влияния наклона горизонтальной оси и коллимационной ошибки в измеряемых зенитных расстояниях светил теодолит должен быть тщательно выверен и горизонтирован, визирование горизонтальной нитью нужно осуществлять вблизи вертикальной нити, а сами светила наблюдать на зенитных расстояниях, превышающих 10—15°. В этом случае влиянием наклона горизонтальной оси и коллимационной ошибки можно пренебречь.

На основании анализа указанных инструментальных погрешностей и теории астрономической рефракции, для точных способов астрономических определений зенитные расстояния светил должны ограничиваться пределами $10^\circ < z < 60^\circ$.

2. Гнутие трубы прибора; погрешности делений вертикального круга

Термин гнутие трубы перешел в геодезическую астрономию из фундаментальной астрометрии, в которой наблюдения светил производятся с помощью больших, стационарных приборов. Сила тяжести, действуя на объективный и окулярный концы трубы такого прибора, сгибает их, причем вследствие различия массы и механических данных объективного и окулярного концов гнутие их происходит не в одинаковой степени. В результате оптическая ось смещается в вертикальной плоскости, что приводит к искажению наблюдаемого зенитного расстояния по опре-

деленному закону. Очевидно, наибольшее влияние гнутия бывает при горизонтальном положении трубы; в вертикальном положении трубы оно принимается равным нулю. На основании этого влияние гнутия на измеряемое зенитное расстояние приближенно может быть выражено формулой

$$\Delta z = g \sin z, \quad (4.17)$$

где g — коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей каждого данного прибора.

Для малых переносных приборов, применяемых в практике геодезической астрономии, механическое гнутие трубы под действием силы тяжести — явление маловероятное. Тем не менее опыт показывает, что закон искажения зенитных расстояний остается тем же самым, а коэффициент гнутия для малых приборов может быть бóльшим по величине, чем для больших приборов. Объяснить это явление для малых переносных приборов можно изменениями во взаимном положении частей оптической системы трубы: в положении поворачивающей призмы, крепление которой в астрономических теодолитах несовершенно, возможными перемещениями линз объектива в своей оправе и т. д.

Изменения во взаимном положении частей оптической системы могут быть вызваны;

а) температурным воздействием среды и наблюдателя на отдельные части прибора;

б) различным действием силы тяжести на отдельные части оптической системы при разных положениях трубы по зенитному расстоянию.

Обе эти причины, влияющие в совокупности на взаимное положение частей оптической системы, приводят к систематическому искажению наблюдаемых зенитных расстояний светил.

При точных астрономических определениях наблюдения светил нужно производить в таких условиях, чтобы влияние гнутия исключалось в среднем выводе определяемых величин. Для этой цели, как будет видно из последующего изложения, светила наблюдают на равных или на близких зенитных расстояниях.

В способах астрономических определений, в которых наблюдения светил производят на различных зенитных расстояниях, гнутие трубы теодолита нужно исследовать и при необходимости учитывать.

При изучении угломерных приборов в курсах геодезии и геодезического инструментоведения подробно рассматриваются систематические и случайные погрешности диаметров лимба и их влияние на измеряемые горизонтальные направления и зенитные расстояния, ходовые погрешности винтов микрометров, погрешности отсчетных приспособлений и т. д. Поэтому повторять изложение этих вопросов здесь не будем.

Зная периоды рассмотренных систематических погрешностей из специальных исследований прибора, можно всегда составить такую программу наблюдений, при которой их влияние на средний вывод определяемой величины будет незначительным.

Совокупное влияние гнуптия, погрешностей делений лимба, отсчетных приспособлений и других инструментальных источников погрешностей составляет для каждого теодолита некоторую систематическую погрешность Δz , являющуюся функцией наблюдаемого зенитного расстояния.

В некоторых приборах эта погрешность может достигать величины порядка нескольких секунд дуги. Поэтому методы наблюдений и обработки нужно строить таким образом, чтобы эта погрешность исключалась в среднем выводе определяемых из наблюдений величин. Рассмотрим, например, как исключить погрешность Δz из определений широты и времени. Для этого, дифференцируя формулу

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

по φ и t и переходя к конечным приращениям, получим:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta z}{\cos A} \quad (\text{а}) \quad \text{и} \quad \Delta t = \frac{\Delta z}{15 \cos \varphi \sin A}. \quad (\text{б})$$

Имея в виду, что $t = T + u - \alpha$, пренебрегая величиной $\Delta \alpha$, получим

$$\Delta u = -\Delta T + \frac{\Delta z}{15 \cos \varphi \sin A}. \quad (\text{в})$$

Из выражения (а) видно, что влияние Δz на вывод широты будет минимальным при наблюдениях светил в меридиане. Для полного исключения Δz из результатов определения широты достаточно произвести наблюдение двух звезд в меридиане примерно на равных зенитных расстояниях по обе стороны от зенита (одну звезду на юге, другую — на севере). В этом случае по наблюдениям южной звезды погрешность в широте будет

$$\Delta \varphi = +\Delta z,$$

а для северной

$$\Delta \varphi = -\Delta z.$$

В среднем значении широты, выведенном из наблюдений северной и южной звезд, влияние систематической погрешности Δz исключается. Рассматривая подобным образом выражение (в); можно заключить, что влияние Δz на вывод поправки часов будет минимальным при наблюдениях светил в первом вертикале. Для полного исключения Δz из результатов определения времени достаточно произвести наблюдение двух звезд в первом вертикале

примерно на равных z по обе стороны от зенита (одну звезду на западе, другую — на востоке). В этом случае погрешность в поправке часов будет:

для западной звезды $\Delta u_W = -\Delta T_W + \Delta z \sec \varphi$,

а для восточной $\Delta u_E = -\Delta T_E - \Delta z \sec \varphi$.

Таким образом, в среднем значении поправки часов влияние Δz исключится.

§ 33. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ СВЕТИЛ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЛИЯНИЕМ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ

Случайные погрешности наблюдений настолько многочисленны и разнообразны по своей природе, что учесть их все практически невозможно. Знак этих погрешностей случаен, а величина для данных средств и условий измерений не может превзойти определенного предела.

Если систематические погрешности, действующие с одним знаком, можно исключить из результатов путем целесообразно построенной методики наблюдений, то влияние случайных погрешностей можно только ослабить за счет увеличения числа измерений, а также изменения условий и средств измерений.

На основании теории погрешностей среднюю квадратическую величину суммарной случайной погрешности измерения можно представить в виде

$$M = \sqrt{\overline{m_i^2}},$$

где m_i — элементарные случайные составляющие общей погрешности.

Так как при априорных подсчетах трудно учесть влияние всех источников погрешностей, то обычно величина M , подсчитанная аргументом, не совпадает точно с ее значением, полученным из наблюдений.

В этом параграфе мы рассмотрим лишь некоторые основные источники случайных погрешностей измерений зенитных расстояний светил, например: визирования на светило, отсчета по вертикальному лимбу, определения наклона оси уровня и остаточное влияние погрешности рефракции и гнутя.

1. Случайная погрешность визирования и ее влияние на измеренное зенитное расстояние светила

Как известно, случайная погрешность однократного визирования на неподвижный предмет может быть представлена формулой

$$m'_b = \frac{b}{W}, \quad (4.18)$$

где b — разрешающая способность невооруженного глаза, для различных наблюдателей $30 < b < 60''$; W — увеличение трубы.

Для визирования методом наведений, когда скорость перемещения светила по направлению, перпендикулярному к нити, мала, случайная погрешность визирования остается практически той же, что и при наблюдении неподвижного предмета, т. е.

$$m_b = \frac{b}{W \sqrt{k}}, \quad (4.19)$$

где k — число наведений визирной нити на светило.

При визировании методом наблюдений моментов прохождения светил через нити неподвижной по высоте трубы средняя квадратическая погрешность момента прохождения зависит от скорости перемещения светила по направлению, перпендикулярному к нити. При этом погрешность определения момента прохождения будет тем больше, чем меньше скорость перемещения, т. е. можно в первом приближении считать

$$m'_T \approx \frac{m_b^s}{V}, \quad (4.20)$$

где m_b^s — средняя квадратическая погрешность визирования на неподвижный предмет, выраженная в секундах времени; V — скорость перемещения светила по направлению, перпендикулярному к нити.

В зависимости от склонения светила δ и угла q , который образуется направлением движения светила с горизонтальной нитью, скорость V выразится формулами (рис. 67):

для горизонтальной нити

$$V = \cos \delta \sin q, \quad (4.21)$$

для вертикальной нити

$$V = \cos \delta \cos q. \quad (4.21')$$

Из рис. 67 видно, что угол q численно равен параллактическому углу светила.

По теореме синусов из параллактического треугольника имеем

$$V = \cos \delta \sin q = \cos \varphi \sin A. \quad (4.22)$$

Опыт наблюдений показывает, что погрешность в оценке момента прохождения светила зависит не только от скорости V ,

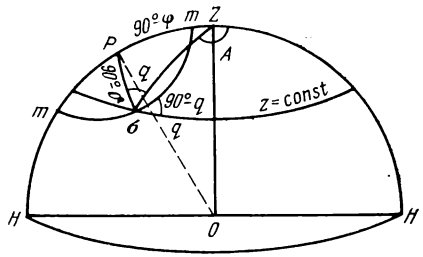


РИС. 67

Метод наблюдений	a	b
«Глаз—ухо»	0,10 ^s	4,7 ^s
«Глаз—клавиша»	0,07	4,0
Контактный микрометр с ручным приводом	0,04	2,8
Контактный микрометр с механическим приводом	0,02	2,5

но и от некоторой случайной величины a , характеризующей метод наблюдения прохождения светил. Таким образом, погрешность m_T можно выразить формулой

$$m_T^2 = \frac{1}{k} \left(a^2 + \frac{m_b^2}{V^2} \right), \quad (4.23)$$

где k — число нитей (контактов), принятых в обработку.

Подставив в (4.23) значение m_b из (4.18) и V из (4.22), получим окончательно

$$m_T^2 = \frac{1}{k} \left[a^2 + \frac{b^2}{(W \cos \varphi \sin A)^2} \right]. \quad (4.24)$$

Необходимо заметить, что величина b при наблюдении подвижных объектов несколько превышает ее значение для неподвижных объектов. В зависимости от метода наблюдений прохождений светил средние численные значения a и b представлены в табл. 10. Заметим, что в зависимости от индивидуальных качеств наблюдателя значения a и b могут несколько отличаться от приведенных в таблице.

Для приближенных расчетов с погрешностью, не превышающей 10% от m_T , значение m_T можно вычислить по формуле

$$m_T = \frac{1}{\sqrt{k}} \frac{b}{W \cos \varphi \sin A}. \quad (4.25)$$

Влияние погрешности момента прохождения на измеренное зенитное расстояние светила можно получить на основании формулы скорости изменения зенитного расстояния

$$\frac{dz}{dt} = \cos \varphi \sin A.$$

Переходя от дифференциалов к средним квадратическим погрешностям, получим

$$m_{z_b} = 15 \cos \varphi \sin A m_T. \quad (4.26)$$

Подставив в (4.26) значение m_T из (4.24), будем иметь

$$m_{zb} = \frac{15}{\sqrt{k}} \sqrt{a^2 (\cos \varphi \sin A)^2 + \frac{b^2}{W^2}} \quad (4.27)$$

или приближенно

$$m_{zb} = \frac{15bs}{W \sqrt{k}} \quad (4.28)$$

Таким образом, на основании (4.19) и (4.28) можно полагать, что погрешность измерения зенитного расстояния светила, зависящая от погрешности визирования, примерно одинакова как для метода наведений в меридиане и его окрестностях, так и для метода прохождений в любом другом вертикале. Если же учесть, что число нитей или контактов k при наблюдении моментов прохождений может быть взято значительно больше числа k в методе наведения, то погрешности m_{zb} могут быть выравнены с большой точностью. На этом основании можно считать, что влияние погрешности визирования при измерении зенитных расстояний светил не зависит от азимутов светил.

Для 2-секундного астрономического теодолита, принимая $W = 50^*$, $k = 9$, для метода «глаз—ухо» $b = 4,7^s$, а для наблюдения с контактным микрометром $b = 2,8^s$, на основании формулы (4.28) получим m_{zb} :

для метода «глаз—ухо» $0,46''$;

для наблюдения с контактным микрометром $0,28''$;

для метода наведения в меридиане при числе наведений $k = 6$

$$m_{zb} = \frac{40''}{W \sqrt{k}} = 0,33''.$$

2. Погрешность отсчета вертикального лимба

Погрешность отсчета вертикального лимба для астрономического теодолита складывается из совместного влияния погрешностей наведения биссектора микроскопа-микрометра на штрих лимба и отсчетов по микроскопам-микрометрам, а также из случайных и систематических погрешностей диаметров лимба. Полагая отсчет вертикального лимба как среднее из отсчетов по двум микроскопам-микрометрам с наведением каждый раз на младший и старший штрихи, можем написать

$$m_L^2 = \frac{m_1^2}{4} + \frac{m_2^2}{4} + \frac{m_3^2}{2}, \quad (4.29)$$

где m_1 — средняя квадратическая погрешность одного наведения биссектора микроскопа-микрометра на штрих лимба и отсчета по микроскопу; m_2 — средняя квадратическая случайная погрешность диаметра лимба; m_3 — средняя квадратическая величина систематической погрешности диаметра лимба.

По материалам многократных исследований для двухсекундных теодолитов имеем [35, часть I, вып. 1]

$$m_1 = 0,35 \sim 0,4'';$$

$$m_2 = 0,2'';$$

$$m_3 = 0,6''.$$

Пользуясь этими данными, по формуле (4.29) найдем

$$m_L = 0,5''.$$

Для ослабления влияния случайных и систематических погрешностей диаметров лимба при измерении зенитных расстояний требуется производить перестановку вертикального круга так же, как это делается при измерениях горизонтальных направлений.

3. Погрешность определения наклона оси уровня

Случайная погрешность наклона оси уровня по отсчетам концов его пузырька определяется известной формулой Рейнгерца

$$m_i = 0,20'' \sqrt{\tau}, \quad (4.30)$$

где τ — цена деления уровня.

При определении наклона оси уровня наиболее трудно учесть влияния таких факторов, как температура окружающей среды, недостаточная жесткость столба для наблюдений, погрешности в шлифовке внутренней поверхности ампулы, неодинаковая кривизна внутренней поверхности уровня на различных ее участках и т. д. Специальные исследования точности определения наклона оси уровня показывают, что влияние перечисленных факторов достигает 5—10% от цены деления уровня. Таким образом, при двукратных отсчетах положения пузырька уровня с ценой деления $\tau = 2''$ погрешность определения наклона его оси составляет

$$m_i = 0,30''. \quad (4.31)$$

4. Остаточное влияние рефракции и гнуптия

При наблюдениях светил на произвольных зенитных расстояниях ($10^\circ < z < 70^\circ$) остаточное (неучтенное) влияние погрешностей рефракции и гнуптия может достигать величины порядка 1—2'', т. е. в несколько раз превышать совокупное влияние всех остальных случайных погрешностей. В точных способах астрономических определений широты и времени (долготы) для ослабления остаточного влияния погрешностей рефракции и гнуптия наблюдения звезд производят на равных или почти на равных зенитных расстояниях. При этом значения зенитных расстояний светил допускаются до 50° , а разность зенитных расстояний звезд — не более 5—7°. При указанном выборе звезд совокупное остаточное

влияние погрешностей рефракции и гнутия, как показывает опыт, не превышает $0,2-0,3''$. Остаточное влияние погрешностей рефракции может быть обусловлено, в частности, неучтенными изменениями температуры и давления за период наблюдения серии из n звезд.

5. Суммарная случайная погрешность измерения зенитного расстояния светила

Ожидаемая суммарная случайная погрешность измерения зенитного расстояния 2-секундным астрономическим теодолитом ($b = 4,7^s$; $W = 50 \times$ $k = 9$; $\tau = 2''$), подсчитанная по формуле (4.17'), с учетом рассмотренных выше величин случайных погрешностей (визирования, отчета по кругу, определения наклона оси уровня и остаточного влияния рефракции и гнутия), будет

$$m_z = \sqrt{m_{z_b}^2 + m_L^2 + m_i^2 + m_p^2}, \quad g = 0,9''. \quad (4.32)$$

Для 5-секундного астрономического теодолита эта же погрешность равна $m_z = 1,6''$.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

§ 34. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ОБЩЕЙ ЗАДАЧИ

Для зенитальных способов астрономических определений основным уравнением, связывающим измеряемую величину z с определяемыми значениями φ и времени s (поправки часов u), является

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (5.1)$$

в котором

$$t = T + u - \alpha,$$

где T — показание хронометра в момент наблюдения светила; α — его прямое восхождение.

С помощью уравнения (5.1) по измеренным зенитным расстояниям светил можно решать задачи как совместного определения широты и времени, так и задачи их раздельного определения. В том и другом случаях задача определения величин φ и u значительно облегчается тем обстоятельством, что их приближенные значения бывают уже заранее известны.

Наиболее общей задачей зенитальных способов является задача совместного определения широты и времени по измеренным зенитным расстояниям светил.

При постановке общей задачи не накладываются какие-либо ограничивающие условия на выбор светил по зенитным расстояниям и азимутам, кроме ограничений, обусловленных влиянием систематических инструментальных и рефракционных погрешностей, а именно $10^\circ < z < 60^\circ$.

Вопросы установления выгоднейших условий наблюдений (условий наивыгоднейшего выбора светил по зенитным расстояниям и азимутам) для целей совместного или раздельного определения широты и времени получают свое разрешение в результате решения общей задачи.

Принципиально решение общей задачи может быть получено не менее чем из двух уравнений (5.1). Однако в общем случае измерение зенитных расстояний светил может производиться при одном положении вертикального круга теодолита (КЛ или КП). В этом случае все измеренные зенитные расстояния светил получают дополнительную неизвестную поправку

$$\Delta z = \zeta = \text{const}$$

за неточное знание места зенита Mz и другие систематические погрешности, общие для группы звезд, поэтому в уравнении (5.1) будет три неизвестных величины φ , u и ζ .

При этом условии решение общей задачи может быть получено минимум из трех уравнений (5.1), т. е. по данным наблюдений по крайней мере трех светил.

Однако необходимо заметить, что решение системы тригонометрических уравнений (5.1) в конечном виде весьма сложно и не может иметь практического значения.

Задача значительно упрощается, если, пользуясь приближенными значениями φ_0 , u_0 и M^0z решить ее с помощью линейных уравнений поправок, вытекающих из выражения (5.1).

Имея в виду, что

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi \quad (5.2)$$

и

$$t_i = T_{H_i} + u_0 + \Delta u + \omega(T_{H_i} - X) - \alpha_i = t_{0_i} + \Delta u, \quad (5.3)$$

где

$$t_{0_i} = T_{H_i} + u_0 + \omega(T_{H_i} - X) - \alpha_i, \quad (5.4)$$

разложим выражение для z , представленное формулой (5.1), в ряд Тейлора по степеням $\Delta\varphi$ и Δu . В практике астрономических определений значения $\Delta\varphi$ и Δu могут быть приняты весьма малыми. Поэтому при разложении в ряд вполне достаточно для практических целей ограничиться линейными членами, т. е.

$$z_i = z_{0_i} + \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi}\right)_i \Delta\varphi + 15 \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)_i \Delta u. \quad (5.5)$$

В выражении (5.5)

$$z_{0_i} = \arccos(\sin \varphi_0 \sin \delta_i + \cos \varphi_0 \cos \delta_i \cos t_{0_i}) \quad (5.6)$$

— вычисленное (счислимое) значение зенитного расстояния с предварительными значениями φ_0 и u_0 и наблюдаемым моментом T_{H_i} ;

$$\left(\frac{\partial z}{\partial \varphi}\right)_i = \pm \cos A_i \text{ и } \left(\frac{\partial z}{\partial t}\right)_i = \pm \cos \varphi_0 \sin A_i, \quad (5.7)$$

В выражениях (5.7) знак плюс соответствует счету азимута светила от точки Юга, знак минус — от точки Севера.

В формулах (5.2)—(5.7) имеем:

T_{H_i} — момент по хронометру наблюдения светила;

X — показание хронометра в средний момент приема радиосигналов времени;

u_0 — поправка хронометра в момент X , полученная из обработки приема радиосигналов с предварительной долготой пункта λ_0 ;

- Δu — поправка к величине u_0 за неверно принятую долготу;
 ω — часовой ход хронометра;
 $(T_{H_i} - X)^h$ — промежуток времени, выраженный в часах, протекший от среднего момента приема сигналов до момента наблюдения светила;
 α_i и δ_i — видимые координаты светила, исправленные поправками за короткопериодические члены нутации.

Сравнивая значение зенитного расстояния, представленное формулой (5.5), с его измеренным значением по отсчетам вертикального круга, получим следующее уравнение поправок

$$z_{0_i} + \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi} \right)_i \Delta \varphi + 15 \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)_i \Delta u = z'_H + \zeta + v_i, \quad (5.8)$$

где

$$z'_H = (L'_i + i_i) - M^0 z + \rho_i + g \sin z_i$$

или

$$z'_H = M^0 z - (R'_i + i'_i) + \rho_i + g \sin z_i, \quad (5.9)$$

ζ — поправка зенитного расстояния за неточно принятое место зенита; v_i — вероятнейшая поправка измеренного зенитного расстояния.

Подставив значения частных производных, получим окончательно уравнение поправок в виде

$$-\zeta \pm \cos A_i \Delta \varphi \pm 15 \cos \varphi_0 \sin A_i \Delta u + l_i = v_i, \quad (5.10)$$

где

$$l_i = z_{0_i} - z'_H. \quad (5.11)$$

Для совместного определения трех неизвестных ζ , $\Delta \varphi$ и Δu необходимо произвести измерения зенитных расстояний по крайней мере трех светил и решить систему из трех уравнений вида (5.10). При отсутствии избыточных измерений система уравнений (5.10) решается как система обычных линейных уравнений, в правых частях которых вместо v_i будут нули.

Если наблюдения серии звезд располагать в промежутке между двумя приемами радиосигналов точного времени, то в результате совместной обработки данных наблюдений и приема радиосигналов возможно непосредственно получить значения географических координат (широты и долготы) пункта наблюдения.

Действительно, если обозначить через u поправку хронометра относительно местного звездного времени в средний момент приема сигналов, а через U — поправку хронометра относительно звездного времени начального меридиана в тот же момент, то

$$\lambda = u - U.$$

Поправка хронометра U относительно гринвичского звездного времени выводится с большой точностью из приема радиосигналов точного времени и не зависит от долготы места наблюдений. Очевидно, $d\lambda = du$, т. е. определяемое значение поправки Δu к приближенному значению u_0 в уравнениях поправок может быть заменено равным ему значением поправки $\Delta\lambda$ к принятой при вычислениях приближенной долготе пункта λ_0 .

Уравнение поправок в этом случае имеет вид

$$-\zeta \pm \cos A_i \Delta\varphi \pm 15 \cos \varphi_0 \sin A_i \Delta\lambda + l_i = v_i. \quad (5.12)$$

В дальнейшем, в зависимости от решаемой задачи, мы будем пользоваться уравнением (5.10) или (5.12).

Из уравнений (5.10) и (5.12) следует, что совместное определение ζ , $\Delta\varphi$ и Δu возможно только при наблюдениях светил в различных вертикалах. Если измерения зенитных расстояний светил произведены в плоскости одного вертикала, то по крайней мере в двух уравнениях из трех коэффициенты будут пропорциональны. Определитель такой системы будет равен нулю, а сама система неразрешима.

В общем случае решение задачи совместного определения φ и u (λ) производится по наблюдениям не трех, а n светил.

Если произведены измерения зенитных расстояний n светил в различных вертикалах, причем $n > 3$, то для определения трех неизвестных будем иметь избыточное число $n - 3$ уравнений.

Из решения системы n уравнений вида (5.10) или (5.12) по методу наименьших квадратов найдем вероятнейшие значения определяемых величин и можем оценить точность их вывода.

Прежде чем перейти к решению системы уравнений поправок по методу наименьших квадратов, выясним вопрос о точности дифференциальных формул (5.10) и (5.12), рассмотрим геометрический смысл этих формул, а также установим веса уравнений поправок.

1. О точности дифференциальных формул

При выводе уравнения поправок зенитальных способов (5.10) или (5.12) мы ограничились линейными членами разложения в ряд Тейлора уравнения (5.1). Вследствие этого одним из основных условий успешного применения указанных дифференциальных формул для решения задач зенитальных способов является условие такого выбора предварительных (счислимых) значений необходимых неизвестных φ_0 и λ_0 , при котором влияние членов высших порядков будет пренебрегаемо мало. Очевидно, в этом случае вероятнейшие поправки $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ будут невелики, а коэффициенты при неизвестных в уравнениях поправок можно вычислять с небольшим числом значащих цифр.

Для решения вопроса о точности, с которой нужно знать предварительные значения φ_0 и λ_0 , проанализируем влияние отброшенных членов разложения второго порядка. Погрешность сво-

бодного члена уравнения поправок, обусловленная влиянием членов разложения второго порядка, будет

$$\Delta l_{II} = \frac{1}{2\rho''} \left(\Delta\varphi^2 \frac{\partial^2 l}{\partial\varphi^2} + 15^2 \Delta\lambda^2 \frac{\partial^2 l}{\partial t^2} \right). \quad (A)$$

Значения вторых производных

$$\frac{\partial^2 l}{\partial\varphi^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial\varphi^2} \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 l}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

получим путем дифференцирования выражений первых производных по φ и t соответственно

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial\varphi} &= \pm \cos A; & \frac{\partial z}{\partial t} &= \pm \cos\varphi \sin A; \\ \frac{\partial^2 z}{\partial\varphi^2} &= -\sin A & \frac{\partial A}{\partial\varphi} &= \pm \operatorname{ctg} z \sin^2 A; \\ \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= \cos\varphi \cos A & \frac{\partial A}{\partial t} &= \pm \cos^2\varphi \cos A (\operatorname{tg}\varphi \pm \cos A \operatorname{ctg} z). \end{aligned} \right\} \quad (B)$$

В формулах (Б) верхние знаки соответствуют счету азимута от точки Юга, а нижние — от точки Севера.

При анализе требуется, чтобы предельное влияние каждого из слагаемых формулы (А) на величину Δl_{II} не превышало $0,05''$.

Предельное влияние первого слагаемого будет, очевидно, при наблюдениях звезд в первом вертикале. При этом для различных значений z предельные значения $\Delta\varphi$ представлены в табл. 11.

Предельное влияние второго слагаемого будет, при прочих равных условиях, для наблюдений южных звезд в меридиане ($\cos A = +1$). В зависимости от зенитных расстояний светил и широты пункта предельные значения $\Delta\lambda$ представлены в табл. 12.

Т а б л и ц а 11

z	10°	20°	30°	40°	50°	60°
$\Delta\varphi_{\text{пред}}$	1'	1,5'	1,8'	2,2'	1,6'	3,2'

Т а б л и ц а 12

φ	z					
	10°	20°	30°	40°	50°	60°
30°	4,4 ^s	6,1 ^s	7,3 ^s	8,3 ^s	9,3 ^s	10,3 ^s
45	5,3	7,0	8,2	9,2	10,0	10,8
60	7,0	9,1	10,3	11,2	12,0	12,6
75	12,1	14,5	15,9	16,7	17,8	17,8

Таким образом, если предварительные координаты пункта отличаются от их истинных значений не более чем на $1-1,5'$, то влиянием членов разложения высших порядков можно пренебречь по малости. С указанной точностью предварительные координаты пункта можно брать уверенно с карты масштаба $1 : 1\,000\,000$ и крупнее.

Практически значения счислимых координат можно получить с точностью до нескольких секунд дуги любым из приближенных способов, изложенных в разделе IV, или же из предварительной обработки нескольких звезд (3—4 звезды или 2—3 пары звезд) тех же наблюдений, которые служат для вывода точных координат пункта.

В том случае, когда предварительные значения координат известны с погрешностью, не превышающей $10''$, коэффициенты при неизвестных в уравнениях поправок достаточно иметь до трех значащих цифр. При этом погрешность уравненных значений неизвестных не превысит $0,03''$.

§ 35. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ УРАВНЕНИЯ ПОПРАВК ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ

Условное (счислимое) зенитное расстояние светила z_0 , вычисленное с условными (предварительными) координатами пункта φ_0 и λ_0 , измеряется на вспомогательной небесной сфере (рис. 68) от условного (счислимого) зенита Z_0 , а истинное (астрономическое) зенитное расстояние z — от астрономического зенита Z . Положение астрономического зенита на небесной сфере соответствует точным значениям координат пункта φ и λ .

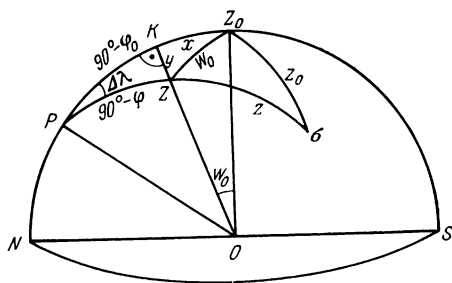
Дуга ZZ_0 , численно равная центральному углу $ZOZ_0 = W_0$, есть уклонение отвесной линии OZ от условной нормали OZ_0 . Она называется условным уклонением отвесной линии.

Если из точки Z опустить сферический перпендикуляр на условный меридиан PZ_0 , то дуга $Z_0k = x$ называется составляющей условного уклонения отвесной линии в меридиане, а дуга $Zk = y$ — составляющей условного уклонения отвесной линии в первом вертикале.

Угол при полюсе между истинным и условным меридианом равен $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ при счете долгот положительными на восток и отрицательными на запад. Из прямоугольного сферического треугольника PZK имеем

$$\left. \begin{aligned} \cos \Delta\lambda &= \operatorname{tg} \varphi \operatorname{ctg} (\varphi_0 + x); \\ \sin y &= \sin (\lambda - \lambda_0) \cos \varphi. \end{aligned} \right\}$$

$$(5.13) \quad \text{РИС. 68}$$



При составлении уравнений поправок (5.12) значения условных координат φ_0 и λ_0 выбираются всегда достаточно близкими к их истинным значениям φ и λ . Поэтому вследствие малости $\Delta\lambda$, x и y пренебрегаем величинами $\Delta\lambda^2$, x^2 и y^2 , и из уравнений (5.13) получим

$$\left. \begin{aligned} x &= \varphi - \varphi_0 = \Delta\varphi; \\ y &= 15(\lambda - \lambda_0)^s \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

С учетом (5.14), уравнение поправок (5.12) будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} -\zeta \pm \cos A_i x \pm \sin A_i y + l_i &= v_i; \\ l_i &= z_{0_i} - z'_{изм_i}. \end{aligned} \right\} \quad (5.15)$$

Выразив вероятнейшее значение измеренного зенитного расстояния в виде $z_i = z'_{изм_i} + \zeta + v_i$, получим, при счете азимутов от точки Севера, зависимость между условным (вычисленным) и вероятнейшим (астрономическим) зенитными расстояниями светила σ

$$z_{0_i} - z_i = x \cos A_i + y \sin A_i. \quad (5.16)$$

Правая часть выражения (5.16) представляет собой поправку вероятнейшего зенитного расстояния (астрономического) за уклонение отвесной линии от условной нормали.

Таким образом, с геометрической точки зрения уравнение поправок (5.15) или (5.12) представляет собой в общем виде зависимость между условным z_{0_i} и астрономическим z_i зенитными расстояниями любой произвольной точки сферы.

В частном случае, если при вычислениях вместо условных координат пункта φ_0 и λ_0 принять геодезические координаты B и L , то уравнения поправок будут автоматически редуцированы к геодезическому зениту, и из уравнивания мы непосредственно получим значения составляющих астрономо-геодезического уклонения отвесной линии ξ и η в пункте наблюдения.

В этом случае выражения (5.14) примут вид

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \varphi - B; \\ \eta &= 15(\lambda - L) \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5.14')$$

В соответствии с равенствами (5.14'), уравнения (5.15) и (5.16) будут

$$\left. \begin{aligned} -\zeta \pm \cos A_i \xi \pm A_i \eta + l_i = v_i; \\ l_i = z_{\text{геод}} - z'_{\text{изм.}} \end{aligned} \right\} \quad (5.15')$$

где

$$\left. \begin{aligned} \cos z_{\text{геод}} &= \sin B \sin \delta + \cos B \cos \delta \cos t_r; \\ t_r &= T_{\text{н}} + u_r + \omega(T_{\text{н}} - X) - \alpha; \\ z_{\text{геод}_i} - z_i &= \xi \cos A_i + \eta \sin A_i; \\ z_i &= z_{\text{взм}} + \zeta + v_i. \end{aligned} \right\} \quad (5.16')$$

Выражение (5.16') представляет собой известную из геодезии зависимость между геодезическим и астрономическим зенитными расстояниями произвольной точки сферы σ .

Уравнения поправок (5.15) и (5.15') совершенно идентичны, следовательно, все дальнейшие наши выводы в отношении оценки точности определяемых величин, установления выгоднейших условий наблюдений, построения различных зенитальных способов астрономических определений будут одними и теми же независимо от того, какие координаты будут использованы при обработке наблюдений — условные или геодезические.

На основании выражений (5.14) и (5.14') получим зависимость между условными и астрономо-геодезическими составляющими уклонения отвесной линии

$$\left. \begin{aligned} \xi - x &= +(\varphi_0 - B); \\ \eta - y &= +15(\lambda_0 - L)^s \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

По формулам (5.17) легко осуществить переход от условных составляющих к астрономо-геодезическим составляющим уклонения отвесной линии, минуя точные астрономические координаты пункта φ и λ .

Таким образом, вводя условные координаты пункта φ_0 и λ_0 , из решения системы уравнений (5.15) находят условные уклонения отвесной линии x и y . Далее, в зависимости от поставленной задачи, из выражений (5.14) определяют φ и λ , а из выражения (5.17) ξ и η .

§ 36. О ВЕСАХ УРАВНЕНИЙ ПОПРАВОК ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ

Вес уравнения поправок вида (5.10) или (5.12), (5.15), (5.15'), равный весу измерения, обратно пропорционален квадрату средней квадратической погрешности свободного члена, т. е.

$$P_i = \frac{c}{m_i^2}. \quad (5.18)$$

Для нахождения m_{i_i} продифференцируем выражение свободного члена уравнения поправок, получим

$$dl_i = dz_{0_i} - dz_{i_{изм}}. \quad (5.19)$$

Величину dz_{0_i} найдем из выражения

$$dz_{0_i} = \frac{\partial z_{0_i}}{\partial \varphi} d\varphi_0 + \frac{\partial z_{0_i}}{\partial t} (dT_i + du_0 - d\alpha_i) + \frac{\partial z_{0_i}}{\partial \delta} d\delta_i.$$

Имея в виду, что при вычислениях z_{0_i} участвовали вполне определенные постоянные значения $\varphi_0 = \text{const}$ и $u_0 = \text{const}$ (т. е. $d\varphi_0 = 0$ и $du_0 = 0$), а также пренебрегая по малости влиянием $d\alpha$ и $d\delta$, будем иметь

$$dz_{0_i} = \frac{\partial z_{0_i}}{\partial t} dT_i = 15 \cos \varphi_0 \sin A_i dT_i. \quad (5.20)$$

Для нахождения $dz'_{i_{изм}}$ продифференцируем выражение

$$z'_{i_{изм}} = L'_i + i_i - M^0 z + \rho_i + g \sin z_i,$$

получим

$$dz'_{i_{изм}} = dL'_i + di_i - dM^0 z + d\rho_i + dg \sin z_i. \quad (5.21)$$

В формуле (5.21) член $dM^0 z = 0$, так как $M^0 z = \text{const}$. Кроме того, при установлении весов уравнений поправок влияние последних двух членов выражения (5.21) можно не учитывать, имея в виду, что в точных способах астрономических определений погрешности таблиц рефракции и гнутия исключаются методикой наблюдений. В приближенных же способах астрономических определений, где возможно значительное остаточное влияние погрешностей рефракции и гнутия, веса уравнений поправок не имеют принципиального значения.

Таким образом, можно положить

$$dz_{i_{изм}} = dL'_i + di_i. \quad (5.22)$$

Подставив значения dz_{0_i} из (5.20) и $dz'_{i_{изм}}$ из (5.22) в формулу (5.19), будем иметь

$$dl_i = 15 \cos \varphi_0 \sin A_i dT_i - dL'_i - di_i. \quad (5.23)$$

Перейдя от дифференциалов к средним квадратическим погрешностям, получим

$$m_{i_i}^2 = (15 \cos \varphi_0 \sin A_i)^2 m_{T_i}^2 + m_{L'_i}^2 + m_{i_i}^2. \quad (5.24)$$

Погрешности m_{T_i} , $m_{L'_i}$ и m_{i_i} и их влияние на результат измерения зенитных расстояний светил были рассмотрены в главе 4.

Для установления веса уравнения поправок воспользуемся приближенным выражением средней квадратической погрешности оценки момента

$$m_{\tau} = \frac{1}{\sqrt{k}} \frac{b}{W \cos \varphi \sin A}. \quad (4.25)$$

С учетом (4.25), формула (5.24) примет вид

$$m_{l_i}^2 = \frac{15^2 b^2}{k W^2} + m_{L_i}^2 + m_{i_i}^2. \quad (5.25)$$

Из выражения (5.25) следует, что величина m_{l_i} не зависит ни от азимута наблюдаемого светила, ни от его зенитного расстояния, а определяется только постоянными прибора (W , τ , m_{L_i} , m_{i_i}), числом визирований k (числом нитей или контактов, принятых в обработку) и методом наблюдений прохождений светил, характеризуемым величиной b (см. табл. 10).

Следовательно, для данного прибора и данного метода наблюдений («глаз—ухо», контактный микрометр, фотоэлектрическая регистрация) при одном и том же числе k средние квадратические погрешности измерения зенитных расстояний светил ($10^\circ < z < 60^\circ$) можно считать практически одинаковыми. На этом основании уравнения поправок зенитальных способов можно считать равноточными и полагать их веса

$$P_i = \frac{c}{m_{l_i}^2} = 1. \quad (5.26)$$

§ 37. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПОПРАВК И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ УРАВНЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН

Разрешив вопрос о весах измерений (весах уравнений поправок), перейдем к решению n уравнений поправок по методу наименьших квадратов и оценке точности уравненных значений определяемых величин.

Для удобства решения в уравнениях поправок введем следующие обозначения коэффициентов:

$$-1 = a, \quad \pm \cos A_i = b_i, \quad \pm \sin A_i = c_i. \quad (5.27)$$

С обозначениями (5.27) уравнение (5.15) примет следующий вид

$$a\zeta + b_i x + c_i y + l_i = v_i \quad \text{с весом } P_i = 1. \quad (5.28)$$

Система нормальных уравнений, соответствующая n уравнениям (5.28), будет

$$\left. \begin{aligned} [aa] \zeta + [ab] x + [ac] y + [al] &= 0; \\ [ab] \zeta + [bb] x + [bc] y + [bl] &= 0; \\ [ac] \zeta + [bc] x + [cc] y + [cl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.29)$$

Система уравнений (5.29) может быть решена как методом последовательного исключения неизвестных по схеме Гаусса, так и с помощью метода определителей, для которого получим значения неизвестных

$$\zeta = \frac{\Delta_{\zeta}}{\Delta}; \quad x = \frac{\Delta_x}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta_y}{\Delta}, \quad (5.30)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} [aa] & [ab] & [ac] \\ [ab] & [bb] & [bc] \\ [ac] & [bc] & [cc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{\zeta} = - \begin{vmatrix} [al] & [ab] & [ac] \\ [bl] & [bb] & [bc] \\ [cl] & [bc] & [cc] \end{vmatrix};$$

$$\Delta_x = - \begin{vmatrix} [aa] & [al] & [ac] \\ [ab] & [bl] & [bc] \\ [ac] & [cl] & [cc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_y = - \begin{vmatrix} [aa] & [ab] & [al] \\ [ab] & [bb] & [bc] \\ [ac] & [bc] & [cl] \end{vmatrix}.$$

Далее, от условных составляющих уклонения отвесной линии x и y по формулам (5.17) переходят к астроному-геодезическим составляющим уклонения отвесной линии ξ и η . В случае необходимости из формул (5.14) по урванным значениям x и y можно получить географические координаты пункта φ и λ :

$$\varphi = \varphi_0 + x;$$

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi.$$

Оценка точности искомых параметров ζ , x и y производится по известным формулам метода наименьших квадратов.

Средняя квадратическая погрешность единицы веса подсчитывается по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{[vv]}{n-3}}. \quad (5.31)$$

Средние квадратические погрешности определяемых величин находят из выражений:

$$m_{\zeta} = \frac{\mu}{\sqrt{P_{\zeta}}}; \quad m_x = \frac{\mu}{\sqrt{P_x}}; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}}, \quad (5.32)$$

где P_{ζ} , P_x и P_y — веса урванных значений неизвестных, определяемые при решении уравнений по схеме Гаусса с помощью весовых коэффициентов или как вес последнего и предпоследнего неизвестного.

При решении системы уравнений с помощью определителей веса определяемых величин найдутся из выражений:

$$P_{\zeta} = \frac{\Delta}{\Delta_{11}}; \quad P_x = \frac{\Delta}{\Delta_{22}}; \quad P_y = \frac{\Delta}{\Delta_{33}}, \quad (5.33)$$

где

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} [bb] & [bc] \\ [bc] & [cc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} [aa] & [ac] \\ [ac] & [cc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{33} = \begin{vmatrix} [aa] & [ab] \\ [ab] & [bb] \end{vmatrix} \quad (5.34)$$

являются алгебраическими дополнениями определителя Δ .

На основании равенств (5.17) средние квадратические погрешности астрономо-геодезических составляющих уклонения отвесной линии будут

$$\left. \begin{aligned} m_{\xi}^2 &= m_x^2 + m_B^2; \\ m_{\eta}^2 &= m_y^2 + m_L^2 \cos^2 \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5.35)$$

Исходя из требований к точности определения геодезических координат B и L пунктов астрономо-геодезической сети и к точности астрономических определений на этих пунктах, можно полагать, что

$$m_B \leq \frac{1}{3} m_x; \quad m_L \leq \frac{1}{3} m_y.$$

Поэтому точность получения уклонений отвесной линии определяется в основном точностью астрономических наблюдений и не зависит от широты пунктов, т. е.

$$m_{\xi} = m_x; \quad m_{\eta} = m_y. \quad (5.36)$$

На основании равенств (5.14) средние квадратические погрешности астрономических координат будут вычисляться по формулам:

$$m_{\varphi} = m_x, \quad m_{\lambda}^s = \frac{m'_y}{15} \sec \varphi. \quad (5.37)$$

Из выражений (5.36) и (5.37) видно, что средняя квадратическая погрешность определения астрономической долготы (времени) возрастает с увеличением широты пропорционально $\sec \varphi$ независимо от методов ее определения. Средние квадратические погрешности определения астрономической широты и астрономо-геодезических составляющих уклонения отвесной линии не зависят от широты пункта.

§ 38. ОБОСНОВАНИЕ ВЫГОДНЕЙШИХ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЙ В ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБАХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Обоснование выгоднейших условий наблюдений в способах астрономических определений строится на общем принципе, применяемом при любых измерениях, а именно, на принципе максимальной точности или, что равноценно, на принципе максимального веса урavnенных значений определяемых величин.

В способах совместного определения нескольких величин нельзя достигнуть максимального веса урavnенного значения одновременно для всех определяемых величин. Поэтому при совместном определении x и y задаются необходимым для решения данной задачи соотношением весов их урavnенных значений, т. е. ставят дополнительное условие вида

$$P_x = kP_y, \quad (5.38)$$

где k — коэффициент пропорциональности, устанавливаемый для каждой конкретной задачи.

Таким образом, для установления выгоднейших условий наблюдений в зенитальных способах астрономических определений нужно обратиться к анализу выражений весов искомым параметров ζ , x и y , представленных формулами (5.33). После несложных преобразований будем иметь

$$P_{\zeta} = n - \frac{[\sin A]^2}{[\sin^2 A]} - \frac{\left\{ [\cos A] - \frac{[\sin A \cos A] [\sin A]}{[\sin^2 A]} \right\}^2}{[\cos^2 A] - \frac{[\sin A \cos A]^2}{[\sin^2 A]}}, \quad (5.39)$$

$$P_x = [\cos^2 A] - \frac{[\cos A]^2}{n} - \frac{\left\{ [\sin A \cos A] - \frac{[\sin A] [\cos A]}{n} \right\}^2}{[\sin^2 A] - \frac{[\sin A]^2}{n}}, \quad (5.40)$$

$$P_y = [\sin^2 A] - \frac{[\sin A]^2}{n} - \frac{\left\{ [\cos A \sin A] - \frac{[\cos A] [\sin A]}{n} \right\}^2}{[\cos^2 A] - \frac{[\cos A]^2}{n}}. \quad (5.41)$$

Из выражений (5.39)—(5.41) следует, что веса определяемых из уравнивания величин являются функциями числа n наблюдаемых светил и их азимутов и не зависят от широты пункта.

При совместном определении x и y (φ и λ) или ξ и η в общем виде можно установить любое желаемое соотношение весов уравненных значений неизвестных, т. е. положить k в равенстве (5.38) любым необходимым числом. Из анализа полученного таким образом соотношения весов будет вытекать требуемое для данного случая распределение звезд по азимутам.

Практически, для способов совместного определения составляющих уклонения отвесной линии ставится условие равенства весов неизвестных, т. е. полагают

$$k = 1 \text{ и } P_x = P_y. \quad (5.42)$$

На основании условия (5.42), из выражений (5.40) и (5.41) следует

$$[\sin^2 A] = [\cos^2 A], \quad (5.43)$$

и

$$[\sin A] = [\cos A].$$

Заметим, что условие (5.42) означает равенство миноров

$$\Delta_{22} = \Delta_{33},$$

из которого вытекают те же условия (5.43).

Выражения (5.43) есть не что иное как условия равномерного распределения наблюдаемых светил по азимутам. Но при условии

равномерного распределения светил по азимутам имеем:

$$\left. \begin{aligned} [\sin A] &= 0; \\ [\cos A] &= 0; \\ [\sin A \cos A] &= 0 \end{aligned} \right\} (5.44)$$

$$\left. \begin{aligned} [\sin^2 A] &= \frac{n}{2}; \\ [\cos^2 A] &= \frac{n}{2}. \end{aligned} \right\} (5.45)$$

Подставив (5.44) и (5.45) в формулы (5.39), (5.40) и (5.41), получим

$$\left. \begin{aligned} P_z &= n; \quad P_x = \frac{n}{2}; \\ P_y &= \frac{n}{2}. \end{aligned} \right\} (5.46)$$

При равномерном распределении светил по азимутам вес P_z будет в два раза больше весов P_x и P_y .

Необходимо отметить, что условия равенства весов будут соблюдены, а следовательно, выражения (5.43)—(5.46) останутся теми же, если измерение зенитных расстояний светил производить в плоскостях двух произвольных взаимно перпендикулярных вертикалов, наблюдая равное число звезд по обе стороны от зенита в каждом из вертикалов.

В качестве примера, подтверждающего указанное положение, произведем подсчет весов неизвестных при их совместном определении по наблюдениям одного и того же числа звезд, например $n = 8$, для случаев, указанных на рис. 69. Подсчет весов произведен в табл. 13.

Таким образом, для обоснования способов совместного определения x и y (ϕ и λ или ξ и η) по измеренным зенитным расстояниям светил при соблюдении равенства весов их уравненных значений наблюдения светил необходимо производить либо при равномерном распределении их по азимутам (рис. 69, а), либо в плоскостях двух произвольных, взаимно перпендикулярных вертикалов симметрично относительно зенита (рис. 69, б, в, г).

Практически строгое соблюдение условий равномерного распределения звезд по азимутам или наблюдений их в плоскостях взаимно перпендикулярных вертикалов не обязательно. Напри-

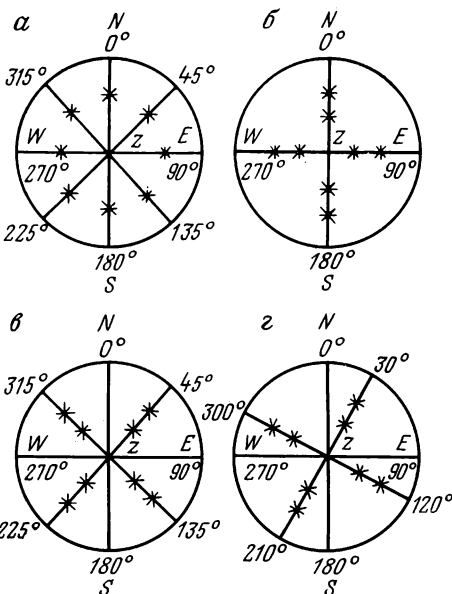


РИС. 69

A	а				б					в					г				
	sin A	sin ² A	cos A	cos ² A	A	sin A	sin ² A	cos A	cos ² A	A	sin A	sin ² A	cos A	cos ² A	A	sin A	sin ² A	cos A	cos ² A
0°	0	0	+1	1	0°	0	0	+1	1	45°	+0,7	0,5	+0,7	0,5	30°	+0,5	0,25	+0,87	0,75
45	+0,7	0,5	+0,7	0,5	0	0	0	+1	1	45	+0,7	0,5	+0,7	0,5	30	+0,5	0,25	+0,87	0,75
90	+1	1,0	0	0	90	+1	1	0	0	135	+0,7	0,5	-0,7	0,5	120	+0,87	0,75	-0,5	0,25
135	+0,7	0,5	-0,7	0,5	90	+1	1	0	0	135	+0,7	0,5	-0,7	0,5	120	+0,87	0,75	-0,5	0,25
180	0	0	-1	1	180	0	0	-1	1	225	-0,7	0,5	-0,7	0,5	210	-0,5	0,25	-0,87	0,75
225	-0,7	0,5	-0,7	0,5	180	0	0	-1	1	225	-0,7	0,5	-0,7	0,5	210	-0,5	0,25	-0,87	0,75
270	-1	1	0	0	270	-1	1	0	0	315	-0,7	0,5	+0,7	0,5	300	-0,87	0,75	+0,5	0,25
315	-0,7	0,5	+0,7	0,5	270	-1	1	0	0	315	-0,7	0,5	+0,7	0,5	300	-0,87	0,75	+0,5	0,25
Σ	0	4	0	4	Σ	0	4	0	4	Σ	0	4	0	4	Σ	0	4	0	4
	$P_{\xi} = n = 8$					$P_{\xi} = n = 8$					$P_{\xi} = n = 8$					$P_{\xi} = n = 8$			
	$P_x = \frac{n}{2} = 4$					$P_x = \frac{n}{2} = 4$					$P_x = \frac{n}{2} = 4$					$P_x = \frac{n}{2} = 4$			
	$P_y = \frac{n}{2} = 4$					$P_y = \frac{n}{2} = 4$					$P_y = \frac{n}{2} = 4$					$P_y = \frac{n}{2} = 4$			

мер, для соблюдения условий равномерного распределения звезд по азимутам достаточно произвести наблюдения равного числа звезд в каждом квадранте горизонта. При обосновании каждого конкретного способа астрономических определений устанавливают допустимые пределы отступлений от принятых условий наблюдений.

Выражения весов уравненных значений неизвестных (5.33), (5.39), (5.40) и (5.41) позволяют установить выгоднейшие условия наблюдений не только для способов совместного определения x и y (φ и λ или ξ и η), но также и для способов их отдельного определения. При этом способы отдельного определения x и y можно рассматривать как частные случаи способов их совместного определения.

Если в способах совместного определения принимается, как правило, условие равенства весов $P_x = P_y$, то в способах отдельного определения выгоднейшими условиями наблюдений являются те, при которых вес определяемой величины будет максимальным, т. е.

$$P_x = \max \text{ и } P_y = \max.$$

Из выражения (5.40) следует, что вес P_x будет максимален при наблюдениях светил в меридиане по обе стороны от зенита, а из выражения (5.41) следует, что вес P_y будет максимальным при наблюдениях светил в первом вертикале также симметрично относительно зенита.

При определении x (φ , ξ) из наблюдений звезд в меридиане $c = \pm \sin A = 0$, и уравнение поправок, составленное для каждой звезды, будет иметь вид

$$a\xi + b_i x + l_i = v_i, \quad (5.47)$$

где

$$i = 1, 2, \dots, n'.$$

Число таких уравнений равно числу звезд n , отнаблюдённых в меридиане.

Нормальные уравнения, соответствующие уравнениям поправок (5.47), будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} [aa] \xi + [ab] x + [al] &= 0; \\ [ab] \xi + [bb] x + [bl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.48)$$

Из решения нормальных уравнений (5.48) получим

$$\xi = \frac{\Delta_\xi}{\Delta}, \quad x = \frac{\Delta_x}{\Delta},$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} [aa] & [ab] \\ [ab] & [bb] \end{vmatrix}; \quad \Delta_\xi = \begin{vmatrix} [ab] & [al] \\ [bb] & [bl] \end{vmatrix}; \quad \Delta_x = \begin{vmatrix} [al] & [aa] \\ [bl] & [ab] \end{vmatrix}.$$

Веса уравненных значений ζ и x будут

$$\left. \begin{aligned} P_{\zeta} &= \frac{\Delta}{[bb]} = [aa] - \frac{[ab]^2}{[bb]} = n' - \frac{[\cos A]^2}{[\cos^2 A]}; \\ P_x &= \frac{\Delta}{[aa]} = [bb] - \frac{[ab]^2}{[aa]} = [\cos^2 A] - \frac{[\cos A]^2}{n'}. \end{aligned} \right\} \quad (5.49)$$

При наблюдениях звезд в меридиане в равном количестве к северу и югу от зенита имеем

$$[\cos A] = 0; \quad [\cos^2 A] = n'.$$

Максимальные значения весов при этих условиях следующие:

$$P_{\zeta_{\max}} = n'; \quad P_{x_{\max}} = n'. \quad (5.50)$$

При определении y (λ, u, η) из наблюдений звезд в первом вертикале будем иметь $b = \pm \cos A = 0$. Уравнения поправок и нормальные уравнения примут вид

$$a\zeta + c_i y + l_i = v_i, \quad i = 1, 2, \dots, n''; \quad (5.50')$$

где

$$\left. \begin{aligned} [aa] \zeta + [ac] y + [al] &= 0; \\ [ac] \zeta + [cc] y + [cl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.51)$$

Искомые значения неизвестных и их веса получим из выражений

$$\zeta = \frac{\Delta_{\zeta}}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta_y}{\Delta},$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} [aa] & [ac] \\ [ac] & [cc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{\zeta} = \begin{vmatrix} [ac] & [al] \\ [cc] & [cl] \end{vmatrix}; \quad \Delta_y = \begin{vmatrix} [al] & [aa] \\ [cl] & [ac] \end{vmatrix},$$

$$P_{\zeta} = \frac{\Delta}{[cc]} = [aa] - \frac{[ac]^2}{[cc]} = n'' - \frac{[\sin A]^2}{[\sin^2 A]}, \quad (5.52)$$

$$P_y = \frac{\Delta}{[aa]} = [cc] - \frac{[ac]^2}{[aa]} = [\sin^2 A] - \frac{[\sin A]^2}{n''}, \quad (5.53)$$

При наблюдениях в первом вертикале симметрично относительно зенита $[\sin A] = 0$, $[\sin^2 A] = n''$, следовательно, максимальные значения весов будут

$$P_{\zeta_{\max}} = n'', \quad P_{y_{\max}} = n''.$$

Необходимо отметить, что для данного числа n звезд, при соблюдении выгоднейших условий наблюдений и при прочих равных условиях веса уравненных значений неизвестных в способах раздельного определения широты и времени и в способах их совместного определения одинаковы.

Действительно, если из общего числа n звезд для определения x были измерены зенитные расстояния $n' = \frac{n}{2}$ звезд в меридиане, а для определения y произведены такие же измерения $n'' = \frac{n}{2}$ звезд в первом вертикале, то (см. рис. 69) это равносильно совместному определению x и y по наблюдению $n = n' + n''$ звезд, равномерно расположенных по азимутам, или наблюдению этих n звезд в плоскостях двух любых взаимно перпендикулярных вертикалов.

Таким образом, положенное в основу способов совместного определения x и y равенство весов $P_x = P_y$ является в то же время наиболее выгодным условием, обеспечивающим получение уравненных значений обеих искомым величин с равным и максимальным весом при данном числе измерений n . Отсюда вытекает важный вывод.

Если при одинаковой методике измерений затраты времени исчислять число наблюдаемых светил, то для достижения одинаковой точности определяемых величин способы совместного определения x и y не имеют преимуществ перед способами их раздельного определения.

В смысле же наиболее полного исключения влияния приборных и внешних источников погрешностей, изменяющихся с течением времени, следует отдать предпочтение раздельным способам астрономических наблюдений.

§ 39. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В основу классификации способов астрономических определений можно, вообще говоря, положить различные принципы, на основе которых оказалось бы возможным сгруппировать различные способы по некоторым сходным, объединяющим их признакам. Одним из таких принципов, связанным с методикой наблюдений, является принцип выбора светил по зенитным расстояниям и азимутам. В этом отношении возможные комбинации выбора светил составляют три основных случая:

в разных азимутах и на разных зенитных расстояниях;

в равных азимутах (в плоскости одного вертикала) и на разных зенитных расстояниях;

в разных азимутах, но на равных зенитных расстояниях.

Обычно первые два случая объединяются в одну общую группу способов, характерную тем, что светила здесь наблюдаются на разных зенитных расстояниях. В связи с этим

способы данной группы можно было бы кратко назвать способами разны́х высот. В этой группе способов определение широты и времени (долготы) или составляющих уклонения от-весной линии (x и y или ξ и η) связано с измерением зенитных расстояний светил. Поэтому способы данной группы называют еще способами определения широты и времени по измеренным зенитным расстояниям светил.

Вторую группу зенитальных способов составляют способы, в которых светила наблюдаются на равных зенитных расстояниях (равных высотах). Поэтому способы данной группы называют кратко способами равных высот.

Характерной особенностью методики наблюдений в данной группе является то, что измерения зенитных расстояний светил

Т а б л и ц а 14

Зенитальные способы астрономических определений

Способы определения широты и долготы (ξ , η) по измеренным зенитным расстояниям светил (способы разных высот)	Способы определения широты и долготы (ξ , η) из наблюдений светил на равных высотах (способы равных высот)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Совместное определение широты и долготы по измеренным зенитным расстояниям n светил в различных вертикалах 2. Совместное определение широты и долготы по измеренным зенитным расстояниям n звезд в плоскостях двух взаимно перпендикулярных вертикалов 3. Совместное определение широты и долготы по измеренным зенитным расстояниям звезд попарно 4. Определение широты по измеренным зенитным расстояниям n светил в меридиане 5. Определение широты по измеренным зенитным расстояниям пар звезд вблизи меридиана 6. Определение широты по измеренной малой разности зенитных расстояний пар звезд в меридиане 7. Определение широты по измеренной малой разности зенитных расстояний пар звезд вблизи меридиана 8. Определение долготы (времени) по измеренным зенитным расстояниям n звезд в первом вертикале 9. Определение долготы (времени) по измеренным зенитным расстояниям пар звезд в первом вертикале 10. Определение широты по измеренному зенитному расстоянию Полярной 11. Определение широты по измеренному зенитному расстоянию Солнца 12. Определение времени (долготы) по измеренному зенитному расстоянию Солнца 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Совместное определение широты и долготы из наблюдений n звезд на равной высоте (в одном альмукантарате) 2. Совместное определение широты и долготы из наблюдений пар звезд на равных высотах 3. Определение широты из наблюдений пар звезд на равных высотах 4. Определение времени (долготы) из наблюдений пар звезд на равных высотах

здесь не связаны с производством точных отсчетов по вертикальному лимбу теодолита.

Поправка к установочному (эфемеридному) зенитному расстоянию находится из обработки наблюдений точно так же, как находится поправка ξ к измеренному зенитному расстоянию за неверно принятое место зенита в первой группе способов.

В каждой из двух указанных групп различные способы можно классифицировать по признаку определяемых из наблюдений величин, например:

способы совместного определения широты и времени (долготы) или составляющих уклонения отвесной линии ξ и η ;

способы определения широты (или ξ);

способы определения времени (долготы или η).

Кроме того, в зависимости от числа наблюдаемых светил все способы можно разделить на способы, в которых искомые величины определяются:

по наблюдениям серий из n звезд;

из наблюдений звезд попарно ($n = 2$);

из многократных наблюдений одиночных светил.

В свете изложенной классификации целесообразные зенитальные способы астрономических определений представлены в табл. 14.

§ 40. РЕДУКЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ В ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБАХ

1. Поправка зенитного расстояния светила за влияние суточной aberrации

Вследствие влияния суточной aberrации светило σ сместится по дуге большого круга σE (рис. 70) по направлению к апексу — точке востока E — на величину

$$\sigma\sigma' = 0,32'' \cos \varphi \sin \sigma E, \quad (5.54)$$

где $0,32'' \cos \varphi$ — постоянная суточной aberrации для точки с широтой φ .

Вследствие aberrационного смещения изменится зенитное расстояние светила на величину Δz , которую и требуется определить,

$$\begin{aligned} \Delta z &= \sigma\sigma' \cos (180 - Q) = \\ &= -0,32'' \cos \varphi \sin \sigma \times \\ &\times E \cos Q. \end{aligned}$$

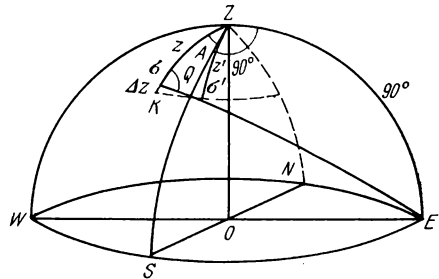


РИС. 70

Из сферического треугольника $Z\sigma E$ по формуле пяти элементов имеем

$$\begin{aligned}\sin \sigma E \cos Q &= \sin z \cos 90^\circ - \cos z \sin 90^\circ \cos (90^\circ + A) = \\ &= \cos z \sin A.\end{aligned}$$

Таким образом, поправка зенитного расстояния за влияние суточной аберрации имеет вид

$$\Delta z = -0,32'' \cos \varphi \sin A \cos z. \quad (5.55)$$

Как видно из формулы, поправка имеет максимальное значение в первом вертикале и равна нулю в меридиане. Часто поправку вводят не в зенитное расстояние, а в момент наблюдения светила T_H . Имея в виду, что $\frac{dz}{dt} = \cos \varphi \sin A$, получим, переходя к конечным приращениям,

$$\begin{aligned}\Delta T_a &= \frac{\Delta z}{15 \cos \varphi \sin A} = - \frac{0,32'' \cos \varphi \sin A \cos z}{15 \cos \varphi \sin A} = \\ &= -0,021^s \cos z.\end{aligned} \quad (5.56)$$

Эту величину ΔT_a и следует всегда вычитать из наблюдаемых моментов T_H . Иногда поправкой за влияние суточной аберрации исправляют искомую функцию зенитного расстояния, например поправку часов,

$$\Delta u_a = +0,021^s \cos z. \quad (5.56')$$

2. Поправка зенитного расстояния, вычисленного со средним моментом, за ускорение движения светила

Для уменьшения случайной погрешности измерений наблюдения каждого светила производятся многократно. Так, например, при измерении зенитных расстояний светил вблизи меридиана на них делается подряд несколько наведений средней горизонтальной нитью под счет ударов хронометра. В результате получают n достаточно близких между собой значений зенитного расстояния светила в соответствующие моменты по хронометру

$$z_1, z_2, \dots, z_n,$$

$$T_1, T_2, \dots, T_n.$$

При измерениях зенитных расстояний светил в произвольных азимутах, как правило, наблюдают моменты прохождения светила через n горизонтальных нитей неподвижной трубы прибора. Здесь также будем иметь n значений z_i (для каждой нити) в соответствующие моменты T_i .

Возможны два пути обработки таких измерений:

1. Каждое наведение (наблюдение на каждой нити) обрабатывается отдельно и независимо от других. При этом для каждого

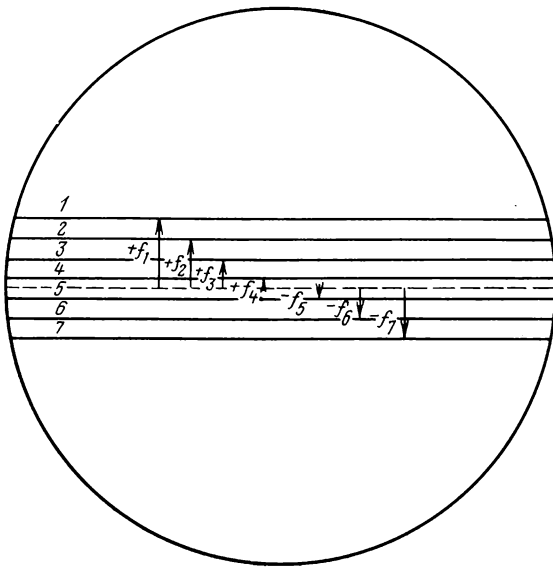


РИС. 71

где

$$\left. \begin{aligned} m &= \pm \cos \varphi \sin \varphi \cos A; \\ n &= \cos^2 \varphi \cos^2 A. \end{aligned} \right\} \quad (5.60)$$

В формулах знак «+» соответствует счету азимута от точки Юга, знак «-» от точки Севера.

Для коэффициентов m и n можно составить компактные таблицы или номограммы по аргументам φ и A . Пример таких таблиц дан в прил. 1.

Таким образом, если зенитное расстояние светила $z_{\text{выч}}$ вычисляется со средним моментом $T_{\text{ср}}$, то его надо исправить поправкой за ускорение, получаемое в общем случае по формуле (5.58).

Поправка за ускорение максимальна в меридиане и равна нулю в первом вертикале. Знак поправки определяется знаком второй производной, т. е. знаком самого ускорения.

Для наблюдений прохождения светила через постоянные нити неподвижной трубы или наблюдений с контактными микрометром, выполненных при одном положении прибора (КП или КЛ), формулу (5.58) можно несколько упростить. Для этого выразим $\sum (T_i - T_{\text{ср}})^2$ через постоянные прибора, а именно, через известные из исследований расстояния между нитями сетки или между контактами микрометра.

Обозначим через f_i расстояние i -ой нити от средней (рис. 71).

В первом приближении можно положить

$$\dot{f}_i = 15 (T_i - T_{\text{cp}}) \frac{dz}{dt},$$

откуда

$$T_i - T_{\text{cp}} = \frac{f_i}{15 \frac{dz}{dt}}.$$

Средняя скорость $\frac{dz}{dt}$ в пределах сетки нитей может быть представлена как

$$\frac{dz}{dt} = \frac{f_1 + (-f_n)}{15 (T_n - T_1)}.$$

Таким образом, имеем

$$T_i - T_{\text{cp}} = \frac{f_i (T_n - T_1)}{f_1 - f_n}$$

или

$$(T_i - T_{\text{cp}})^2 = 100^2 \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2 \frac{f_i^2}{(f_1 - f_n)^2};$$

$$\sum (T_i - T_{\text{cp}})^2 = 100^2 \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2 \frac{\sum f_i^2}{(f_1 - f_n)^2}.$$

Подставив значение $\sum (T_i - T_{\text{cp}})^2$ в формулу (5.58), получим

$$\Delta z_{\text{ш}} = \frac{15^2 \cdot 100^2}{2\rho''} \frac{d^2 z}{dt^2} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2 \frac{\sum f_i^2}{n (f_1 - f_n)^2}.$$

Обозначим постоянную для данного прибора

$$\frac{\sum f_i^2}{n (f_1 - f_n)^2} = F,$$

тогда

$$\Delta z_{\text{ш}} = 5,454 \cdot F \frac{d^2 z}{dt^2} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2. \quad (5.61)$$

Формула (5.61) пригодна для вычислений поправки $\Delta z_{\text{ш}}$ с сеткой, в которой расстояния между нитями произвольны.

Если сетка нитей симметричная (см. рис. 71), т. е. нити в ней расположены на равных расстояниях f_0 друг от друга (с точностью до $10''$), то формула для вычисления поправки за ускорение может быть упрощена.

Для симметричной сетки будем иметь

$$\begin{aligned}\sum f_i^2 &= 2 \left[f_0^2 + (2f_0)^2 + (3f_0)^2 + \dots + \left(\frac{n-1}{2} f_0 \right)^2 \right] = \\ &= 2f_0^2 \left[1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + \left(\frac{n-1}{2} \right)^2 \right].\end{aligned}$$

Из теории рядов известно, что

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + k^2 = \frac{k(k+1)(2k+1)}{1 \cdot 2 \cdot 3}.$$

Поэтому

$$\sum f_i^2 = \frac{2f_0^2 \frac{n-1}{2} \left(\frac{n-1}{2} + 1 \right) \left(2 \frac{n-1}{2} + 1 \right)}{6} = \frac{f_0^2 n(n-1)(n+1)}{12}.$$

Квадрат расстояния между крайними нитями равен

$$(f_1 - f_n)^2 = (n-1)^2 f_0^2.$$

Подставив $\sum f_i^2$ и $(f_1 - f_n)^2$ в выражение для F , получим

$$F = \frac{\sum f_i^2}{n(f_1 - f_n)} = \frac{f_0^2 n(n-1)(n+1)}{f_0^2 n(n-1)^2 \cdot 12} = \frac{n+1}{12(n-1)}.$$

После подстановки полученной величины F в формулу (5.61) будем окончательно иметь

$$\Delta z_W = 0,454 \frac{n+1}{n-1} \frac{d^2 z}{dt^2} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2, \quad (5.62)$$

где n — число нитей или контактов, принятых в обработку; T_n — момент по хронометру прохождения светила через n -ую нить; T_1 — то же, для первой нити.

Если наблюдения зенитных расстояний светил производятся при двух положениях вертикального круга прибора, то формула поправки за ускорение будет

$$\Delta z_W = 5,454 \frac{d^2 z}{dt^2} \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2, \quad (5.63)$$

где

$$\Delta T = T_H - T_{L,R}, \quad T_H = \frac{T_L + T_R}{2}, \quad T_{L,R} = \frac{\sum T_{L_i, R_i}}{n}.$$

Формула (5.63) является приближенной, однако для наблюдений с контактными микрометром она обеспечивает вычисление поправки за ускорение с погрешностью не превышающей 0,03'' при продолжительности приема $|T_R - T_L| < 10^m$.

3. Поправка за ширину контактов и мертвый ход винта контактного микрометра

При наблюдениях с контактным микрометром исследование ширины контактов производится на каждом астрономическом пункте, а исследование мертвого хода — в каждый вечер наблюдений. Поправка вычисленного зенитного расстояния за ширину контактов и мертвый ход определяется по формуле

$$\Delta z_{\gamma} = \pm [\pm \text{Шк} - Mx] \frac{R}{2}, \quad (5.64)$$

где Шк — средняя ширина контактов, в оборотах винта микрометра; Mx — мертвый ход, в оборотах шкалы микрометра; R — цена оборота контактного микрометра, выраженная в секундах градусной меры.

Знак при Шк будет положительный, если рабочая отметка на хронографической ленте получается в момент размыкания цепи, отрицательный — в момент ее замыкания. Поправка Δz_{γ} берется со знаком «плюс» для западных звезд и со знаком «минус» — для восточных.

4. Поправка разности шкал координированного времени UTC и всемирного времени UT1

Эталонные радиосигналы времени передаются в системе всемирного координированного времени UTC (SU), а обработка астрономических наблюдений выполняется в системе всемирного времени UT1 (SU). В полевых условиях при обработке приемов эталонных радиосигналов времени учитываются разности шкал всемирного и координированного времени

$$UT1 - UTC = DUT1 + dUT1,$$

передаваемые во время радиопередач по азбуке Морзе или путем окрашивания радиосигналов по специальной схеме, с точностью до $0,01^s$. Такая точность допустима для предварительного контроля качества выполненных полевых наблюдений, но недостаточна для вывода окончательных значений долготы пункта Лапласа и геодезического азимута направления. При окончательной обработке астрономических наблюдений необходимая точность учета поправок координированного времени должна быть, по крайней мере, на порядок выше указанной.

В нашей стране разности UT1 (SU) — UTC (SU), выраженные в $0,0001^s$, публикуются в бюллетенях «Всемирное время» (серии А и Е) междуведомственной комиссией единой службы времени при Государственном комитете стандартов Совета Министров СССР.

Указанными поправками и пользуются при окончательной обработке результатов приемов радиосигналов времени. При этом время в системе UT1 (SU) получают по формуле (2.10), т. е.

$$UT1 (SU) = UTC (SU) + (UT1 - UTC) + \Delta T.$$

5. Лично-инструментальное уравнение и его влияние на уравненные значения определяемых величин

Из специальных исследований установлено, что погрешность визирования на предмет зависит от личных качеств наблюдателя, связанных, в частности, с разрешающей способностью его глаза, а также с некоторыми другими психо-физиологическими данными. При этом для каждого наблюдателя обнаруживается характерная систематическая составляющая в общей погрешности визирования. Из этих же исследований установлено, что величина личной погрешности визирования может изменяться в зависимости от некоторых данных прибора, например качества оптики, увеличения трубы, толщины нитей, а также от формы и условий освещенности (яркости) визирной цели.

Постоянная составляющая лично-инструментальной погрешности визирования при наблюдениях неподвижных объектов, как правило, мала по абсолютному значению и, кроме того, в разности измеренных направлений (например, в углах или в приведенном ряде направлений) она исключается из результатов наблюдений. При наблюдениях подвижных объектов, в частности небесных светил, процесс визирования значительно усложняется, так как он становится связанным с системой счета времени. При визировании методом «глаз—ухо» наблюдатель, слушая секундные удары хронометра, оценивает на глаз до десятых долей секунды момент пересечения светилом визирной нити трубы прибора. При таком методе визирования постоянная составляющая лично-инструментальной погрешности существенно увеличивается, и с ней нельзя не считаться в точных методах астрономических определений.

Постоянная составляющая ΔT лично-инструментальной погрешности в оценке моментов T прохождения светила через нити прибора называется лично-инструментальным уравнением наблюдателя. Абсолютное значение лично-инструментального уравнения при наблюдениях методом «глаз—ухо» для некоторых наблюдателей достигает $0,5^s$, а в редких случаях $0,8^s$.

Схематически возникновение лично-инструментального уравнения можно представить так: наблюдателю кажется, что звезда пересекает нить в то время, когда она еще не дошла до нити или уже перешла ее. В первом случае, т. е. при упреждении, мы получим отрицательное лично-инструментальное уравнение, а во втором случае, т. е. при запаздывании — положительное.

Из дальнейшего изложения будет видно, что поправка в долготу пункта за влияние лично-инструментальной погрешности по абсолютному значению равна величине этой погрешности, т. е.

$$\partial\lambda = -\partial T. \quad (5.65)$$

На этом основании лично-инструментальное уравнение наблюдателя находится из определений долготы фундаментального или основного пункта по формуле

$$\partial\lambda = -\partial T = \lambda_{\text{осн}} - \lambda'_{\text{опр}}, \quad (5.66)$$

где $\lambda_{\text{осн}}$ — известная точная долгота основного пункта ($m_{\lambda_{\text{осн}}} \leq \leq 0,005^s$); $\lambda'_{\text{опр}}$ — долгота основного пункта, полученная из наблюдений.

Лично-инструментальное уравнение, полученное из таких определений, как разность точной и наблюдаемой долготы основного пункта, называется лично-инструментальной разностью наблюдателя. Лично-инструментальная разность определяется перед началом и после окончания полевого сезона, а иногда и в середине.

Долготы полевых астрономических пунктов исправляются поправками за лично-инструментальную разность наблюдателя по формуле

$$\lambda = \lambda' + \partial\lambda, \quad (5.67)$$

где $\partial\lambda = \frac{\partial\lambda_1 + \partial\lambda_2}{2}$ — среднее значение личной разности из двух соседних ее определений в рабочем сезоне.

Из статистической обработки большого материала определений лично-инструментальной разности многих наблюдателей установлено, что при наблюдениях методом «глаз—ухо» лично-инструментальное уравнение не остается постоянным для одного и того же наблюдателя, а изменяется с течением времени в значительных пределах (до $0,2—0,3^s$).

В связи с этим в настоящее время для точных определений долгот пунктов применяют приборы, которые позволяют значительно уменьшить абсолютную величину лично-инструментального уравнения (до нескольких сотых долей секунды времени) и, что самое главное, делают лично-инструментальное уравнение более устойчивым. Одним из таких приборов является контактный микрометр. При наблюдениях с контактным микрометром подвижная нить микрометра удерживается вращением рукоятки ручного привода на перемещающемся в поле зрения трубы изображении звезды. При этом с помощью контактного устройства получают автоматическую запись моментов контактирования на ленте хронографа.

Влияние лично-инструментальной погрешности на зенитное расстояние светила или, что равнозначно, на свободный член уравнения поправок будет

$$\partial z_i'' = \delta l_i'' = \partial T \cdot 15 \cos \varphi \sin A_i. \quad (5.68)$$

По результатам многих исследований установлено, что при наблюдениях с контактными микрометром ошибка ∂T относительно постоянна и практически не зависит от скорости движения звезд.

В общем виде определение влияния лично-инструментального уравнения на уравненные значения ζ , x и y можно получить на основании решения той же системы нормальных уравнений, из которой находились ζ , x и y . Для этого нужно произвести соответствующую замену неизвестных и свободных членов их искомыми поправками, т. е. решить систему нормальных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} [aa] \partial \zeta + [ab] \partial x + [ac] \partial y + [a\delta l] &= 0; \\ [ab] \partial \zeta + [bb] \partial x + [bc] \partial y + [b\delta l] &= 0; \\ [ac] \partial \zeta + [bc] \partial x + [cc] \partial y + [c\delta l] &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (5.69)$$

где $\partial \zeta$, ∂x , ∂y — поправки за влияние лично-инструментального уравнения.

При условии более или менее равномерного распределения светил по азимутам, а также при соответствующем подборе звезд попарно можно положить

$$[ab] = [ac] = [bc] \approx 0. \quad (5.70)$$

В этом случае значения искоемых поправок находят из следующих выражений

$$\partial \zeta = - \frac{[a\delta l]}{[aa]}; \quad \partial x = - \frac{[b\delta l]}{[bb]}; \quad \partial y = - \frac{[c\delta l]}{[cc]}. \quad (5.71)$$

Подставив значения коэффициентов a , b , c и свободных членов, получим окончательно

$$\partial \zeta = \frac{15\partial T \cos \varphi}{n} [\sin A_i]; \quad (5.72)$$

$$\partial x = - \frac{15\partial T \cos \varphi}{[\cos^2 A]} [\sin A_i \cos A_i]; \quad (5.73)$$

$$\partial y = - \frac{15\partial T \cos \varphi}{[\sin^2 A]} [\sin^2 A_i] = -15\partial T \cos \varphi. \quad (5.74)$$

Из выражения (5.72) следует, что $\partial \zeta = 0$ при равномерном распределении звезд по азимутам, а также при попарном наблюдении звезд в плоскости одного вертикала по обе стороны оси зенита ($A_1 = 180^\circ + A_2$) и при соблюдении условий симметричности относительно меридиана ($A_2 = 360^\circ - A_1$).

Из формулы (5.73) следует, что $\partial x = 0$ при равномерном распределении звезд по азимутам, при наблюдении звезд в меридиане, а также при наблюдениях звезд парами в азимутах, симметричных

относительно меридиана ($A_2 = 360^\circ - A_1$) и в азимутах, симметричных относительно первого вертикала ($A_2 = 180^\circ - A_1$).

Из выражения (5.74) видно, что влияние лично-инструментальной разности на величину y для данного пункта постоянно.

Имея в виду, что $dy = 15 \cos \varphi d\lambda$, из выражения (5.74) получим

$$d\lambda = -dT, \quad (5.75)$$

т. е. поправка в долготу пункта по абсолютному значению равна лично-инструментальной погрешности наблюдателя, на что указывалось в начале параграфа.

6. Поправки за влияние короткопериодических членов нутации

Если окончательная обработка результатов астрономических определений производится на ЭВМ, то, как правило, современные программы вычисления видимых мест звезд автоматически учитывают влияние короткопериодических членов нутации. Если же вычисления выполняются с помощью Астрономического Ежегодника СССР и обычных вычислительных средств, то необходимо учитывать поправки за влияние короткопериодических членов нутации, так как координаты звезд в каталоге видимых мест даны без учета этих поправок (кроме близполюсных звезд).

Учет влияния короткопериодических членов нутации можно производить двумя путями:

вводить поправки в видимые экваториальные координаты светил, выбираемые из АЕ, по известным формулам сферической астрономии:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{nut}} &= A'a + B'b; \\ \Delta\delta_{\text{nut}} &= A'a' + B'b' \end{aligned} \right\} \quad (5.76)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{nut}} &= f' + \frac{1}{15} g' \sin(G + \alpha) \operatorname{tg} \delta; \\ \Delta\delta_{\text{nut}} &= g' \cos(G + \alpha); \end{aligned} \right\} \quad (5.77)$$

исправлять соответствующими поправками уравненные значения φ и λ (x и y), полученные из наблюдений, произведенных в течение одного вечера (2—4 ч).

Второй путь — при ручном счете — менее трудоемкий, чем первый. Поэтому его рассмотрение представляется целесообразным. Из геометрии небесной сферы известно, что задача определения широты φ и времени s в некоторый момент сводится к определению экваториальных координат зенита z места наблюдений в этот момент, так как

$$\varphi = \delta_z \text{ и } s = \alpha_z.$$

На этом основании формулы поправок за короткопериодические члены нутации для момента $s_{cp} = \alpha_2$ можно получить непосредственно из выражений (5.77) независимо от применяемых способов определения географических координат, т. е.

$$\Delta\varphi_{nut} = \Delta\delta_{z_{nut}} = g' \cos(G' + s_{cp}), \quad (5.78)$$

$$\Delta\lambda_{nut} = \Delta\alpha_{z_{nut}} = f' + \frac{1}{15} g' \operatorname{tg} \varphi \sin(G' + s_{cp}), \quad (5.79)$$

где $\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \delta_2$.

На основании (5.78), (5.79) формулы для учета короткопериодических членов нутации в значениях x и y будут

$$\Delta x_{nut} = \Delta\varphi_{nut} = g' \cos(G' + s_{cp}), \quad (5.80)$$

$$\Delta y_{nut} = 15 \cos \varphi \Delta\lambda_{nut} = 15f' \cos \varphi + g' \sin \varphi \sin(G' + s_{cp}). \quad (5.81)$$

Формулами поправок за короткопериодические члены нутации (5.78)—(5.81) можно пользоваться при обработке наблюдений, выполненных в течение одного вечера (2—4 ч). Если производится совместное уравнивание наблюдений, выполненных в течение нескольких вечеров, без предварительного уравнивания по отдельным вечерам, то в этом случае необходимо учитывать поправки за короткопериодические члены нутации в видимых местах звезд, интерполируемых из АЕ на момент наблюдения.

7. Поправки широты и долготы за приведение к центру знака

Для определения широты и долготы астрономический теодолит устанавливают на астрономическом столбе или штативе, положение которого, как правило, не совпадает с центром геодезического пункта.

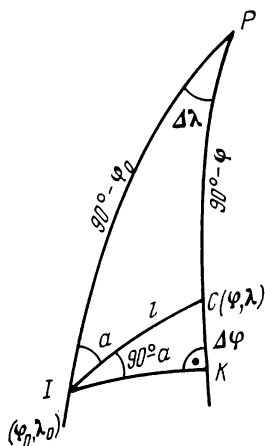


РИС. 72

Чтобы сложные конструкции геодезического сигнала или пирамиды, установленные над центром пункта, не мешали наблюдениям звезд, астрономический столб устанавливают в стороне от пункта на расстоянии, равном удвоенной или утроенной высоте геодезического знака. В этом случае значения широты и долготы, определенные для точки I (рис. 72), необходимо привести к центру знака C . Для такого приведения измеряют элементы центрировки: горизонтальное положение линии $l = IC$ и астрономический азимут a направления IC . Расстояние измеряют лентой или рулеткой с погрешностью, не превышающей 0,05 м, а азимут — с погрешностью, не превышающей 30". Для вывода формул

приведения опустим сферический перпендикуляр IK на меридиан точки C . Широту и долготу точки I обозначим через φ_0 и λ_0 , а точки C — через φ и λ . Треугольник IKC , по малости его сторон, можно считать плоским. Тогда

$$\Delta\varphi = KC = \varphi - \varphi_0 = l \cos \alpha.$$

В градусной мере поправка широты за приведение к центру знака будет

$$\Delta\varphi'' = \frac{\rho''}{M_0} l \cos \alpha = \frac{l \cos \alpha}{I}, \quad (5.82)$$

где M_0 — радиус кривизны меридиана в точке наблюдения; $I = \frac{M_0}{\rho}$ — длина дуги в $1''$ меридиана (в метрах) — выбирается из табл. 53 АТ¹ по аргументу φ_0 .

Для приведения долготы решим прямоугольный сферический треугольник PIK . По второму правилу Модюи — Непера имеем $\sin IK = \sin \Delta\lambda \cos \varphi_0$.

По малости IK и $\Delta\lambda$ получим

$$\Delta\lambda = IK \sec \varphi_0.$$

Из плоского треугольника IKC найдем $IK = l \sin \alpha$. В секундах часовой меры катет IK будет

$$IK^s = \frac{1}{15} \frac{\rho''}{N_0} l \sin \alpha, \quad (5.83)$$

где N_0 — радиус кривизны нормального сечения первого вертикала.

Поправка долготы, с учетом (5.83), будет

$$\Delta\lambda^s = \frac{l \sin \alpha}{15II}, \quad (5.84)$$

где $II = \frac{N_0}{\rho''} \cos \varphi_0$ — длина дуги в $1''$ параллели (в метрах) — выбирается из табл. 53 АТ по аргументу φ_0 .

Таким образом, формулы приведенных значений широты и долготы имеют вид

$$\varphi' = \varphi_0 + \Delta\varphi = \varphi_0 + \frac{l \cos \alpha}{I}, \quad (5.85)$$

$$\lambda' = \lambda_0 + \Delta\lambda = \lambda_0 + \frac{l \sin \alpha}{15II}. \quad (5.86)$$

8. Поправки широты и долготы за приведение к «среднему полюсу» — международному условному началу

Сущность и теория вопроса о периодическом движении полюсов Земли рассматриваются в курсе сферической астрономии. Там же выводятся формулы поправок для приведения широты и долготы

¹ АТ — здесь и далее «Астрономические таблицы». — Тр. Центрального научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии, 1963, вып. 163.

к «среднему полюсу» — международному условному началу (МУН)¹.

Эти формулы имеют следующий вид

$$\varphi = \varphi' - \Delta\varphi_p = \varphi - (X \cos \lambda - Y \sin \lambda), \quad (5.87)$$

$$\lambda = \lambda' - \Delta\lambda_p = \lambda' - \frac{1}{15} (X \sin \lambda + Y \cos \lambda) \operatorname{tg} \varphi, \quad (5.88)$$

где φ и λ — широта и долгота, редуцированные к международному условному началу (МУН), φ' и λ' — мгновенные значения широты и долготы, X и Y — координаты мгновенного полюса, выбираемые из бюллетеней «Всемирное время» для эпохи наблюдений.

Формула (5.88) для редукции долготы к «среднему полюсу» получена в предположении, что всемирное время выражено в системе UT1, т. е. отнесено к условному международному началу (МУН).

§ 41. О ТОЧНОСТИ ЗЕНИТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Оценка точности результатов астрономических определений зенитальными способами в общем случае может быть произведена по формулам (5.32)

$$m_\zeta = \frac{\mu}{V P_\zeta}; \quad m_x = \frac{\mu}{V P_x}; \quad m_y = \frac{\mu}{V P_y}.$$

¹ Решением XIV Генеральной ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза в 1969 г. было принято за Международное условное начало движения полюса (МУН) положение полюса, которое соответствует указанным в решении широтам пяти станций Международной службы широты (МСШ). Номинально оно близко к вычисленному по данным МСШ среднему положению полюса за 1900—1905 гг. Относительно МУН определяют координаты мгновенного полюса X и Y путем усреднения наблюдений широт на станциях за небольшой период времени, равный в настоящее время одной неделе.

В последние годы Международная служба широты преобразована в Международную службу Полярного движения (МСПД) с включением в нее дополнительных станций. В 1968 г. Международное бюро времени (МБВ) также организовало службу определения координат полюса, используя при этом как широтные, так и долготные наблюдения на многочисленных станциях, сотрудничающих с МБВ. С 1969 г. ведет регулярные определения координат полюса по доплеровским наблюдениям навигационных спутников системы «Транзит» военно-морского флота США еще одна служба «Дальгреновская мониторинговая полярная служба» (ДМПС).

С 1972 г. МБВ публикует координаты мгновенного полюса X и Y , полученные в результате совместной обработки данных МБВ и ДМПС.

Одновременно с установлением МУН было принято новое начало счета долгот, которое реализуется в настоящее время косвенным образом, как результат обработки долготных наблюдений на службах времени, сотрудничающих в рамках МБВ.

Начало счета долгот общеземной системы координат задается принятыми долготами этих обсерваторий в системе МУН. Начало счета долгот лежит на экваторе ($\varphi = 0$) и не зависит, как это следует из (5.88), от положения полюса.

Начальный меридиан в общеземной системе координат определяется как меридиан, проходящий через МУН и начало счета долгот.

В этих формулах веса уравненных значений P_z , P_x и P_y определяются из выражений (5.33) или (5.39), (5.40), (5.41), а средняя квадратическая погрешность единицы веса — из выражения (5.31). При априорных подсчетах точности средняя квадратическая погрешность единицы веса может быть вычислена также на основании формулы (5.18):

$$P_i = \frac{c}{m_{l_i}^2}.$$

В § 36 установлено, что измерения зенитных расстояний равноточны, т. е.

$$m_{l_1} = m_{l_2} = \dots = m_{l_n} = m_l \text{ и } P_i = \frac{c}{m_l^2} = 1, \quad (5.89)$$

Поэтому средняя квадратическая погрешность единицы веса будет

$$\mu = \sqrt{c} = m_l. \quad (5.90)$$

На основании (5.19), (5.20) и (5.21), с учетом погрешностей экваториальных координат светила, получим

$$dl = dz_0 - dz_{\text{изм}} = (15 \cos \varphi \sin A dT - 15 \sin q \cos \delta d\alpha + \cos q d\delta) - (dL + di + d\rho + dg \sin z).$$

Перейдя от дифференциалов (истинных погрешностей) к средним квадратическим погрешностям, получим

$$\mu^2 = m_l^2 = 15^2 \cos^2 \varphi \sin^2 A m_T^2 + 15^2 \sin^2 q \cos^2 \delta m_\alpha^2 + \cos^2 q m_\delta^2 + m_L^2 + m_i^2 + m_\rho^2 + m_g^2 \sin^2 z. \quad (5.91)$$

После подстановки значения m_T из формулы (4.25) и имея в виду, что для каталога FK4

$$15 m_\alpha \cos \delta \approx m_\delta \leq 0,1'', \quad (5.92)$$

будем иметь

$$\mu = m_l^2 = \frac{15^2 b^2}{W^2 k^2} + m_\delta^2 + m_L^2 + m_i^2 + m_\rho^2 + m_g^2 \sin^2 z. \quad (5.93)$$

Подставив в (5.93) значения составляющих случайных погрешностей наблюдений (см. § 33, гл. 4) и погрешностей координат светила, получим ожидаемые значения погрешностей единицы веса для различных методов наблюдений.

В табл. 15 приведены значения ожидаемых погрешностей единицы веса для наблюдений с двухсекундными и пятисекундными теодолитами, а также значения погрешностей, полученных из многократных наблюдений теми же приборами в различных физико-географических условиях.

Из табл. 15 видно, что наиболее точные результаты астрономических определений зенитальными способами могут быть достигнуты из наблюдений способами равных высот. Применение

Метод наблюдений	Средняя квадратическая погрешность единицы веса μ			
	Астрономический теодолит АУ2/2		Астрономический теодолит У5	
	ожидаемая	по результатам многократных наблюдений	ожидаемая	по результатам многократных наблюдений
Измерение зенитных расстояний светил; метод «глаз—ухо» или метод наведений (в меридиане)	0,9"	1,3"	1,6"	1,8"
Наблюдение звезд на равных высотах; метод «глаз—ухо»	0,7"	1,1"	1,2"	1,5"
Наблюдение звезд на равных высотах; контактный микрометр	0,6"	0,8"	0,9"	1,2"
Наблюдение звезд на равных высотах; фотоэлектрическая регистрация	0,5"	0,7"	—	—

полуавтоматических (контактный микрометр) и автоматических (фотоэлектрическая насадка) средств регистрации звездных прохождений не только ослабляет (исключает) систематическое влияние личной погрешности наблюдателя, но и существенно повышает точность астрономических определений.

На основании данных табл. 15 по формулам (5.32) можно подсчитать ожидаемые значения средних квадратических погрешностей определения широты и времени (долготы) различными зенитальными способами.

Рассмотрим среднюю квадратическую погрешность определения широты по измеренным зенитным расстояниям пары звезд в меридиане с помощью 2-секундного астрономического теодолита

$$m_x = m_\varphi = \frac{\mu}{\sqrt{P_x}} = \frac{1,3''}{\sqrt{2}} = 0,9''.$$

Таким образом, для определения широты пункта со средней квадратической погрешностью 0,3" необходимо произвести наблюдения (с достаточным запасом прочности) 12—15 пар звезд.

Для совместного определения широты и долготы способом равных высот, при соблюдении условий равенства весов $P_x = P_y = \frac{n}{2}$, будем иметь

$$m_x = m_y = \frac{\mu}{\sqrt{\frac{n}{2}}}. \quad (5.94)$$

Однако в практике применения способа равных высот «часовые» звезды, как правило, преобладают над «широтными», так как количество звезд, наблюдаемых около первого вертикала в средних и высоких широтах, в силу законов суточного движения светил значительно больше, чем звезд, наблюдаемых около меридиана. Поэтому обычно вес P_y всегда больше P_x .

По материалам многолетних наблюдений различных наблюдателей можно установить, что для наблюдений, выполненных в широтах $50-60^\circ$, соотношение указанных весов составляет в среднем

$$\frac{P_y}{P_x} \approx 2. \quad (5.95)$$

Приведенное соотношение весов указывает на то, что в практике применения способа равных высот составляющая уклонения отвесной линии в меридиане x определяется в $\sqrt{2}$ раза грубее, чем составляющая в первом вертикале y . Однако принято считать, что при окончательном выводе величины y это несоответствие компенсируется за счет случайных колебаний личного уравнения наблюдателя. Эти колебания наиболее сильное влияние оказывают при выводе y и не влияют на вывод x . Практически за двухчасовой промежуток времени между приемами сигналов времени двух соседних радиостанций можно произвести наблюдения 12—16 звезд. Для наших расчетов примем за нормальную серию из 12 звезд ($n = 12$). Для такой серии на основании (5.95) можно ожидать следующее распределение весов:

$$P_x = 4; P_y = 8. \quad (5.96)$$

Для наблюдений 2-секундным астрономическим теодолитом с контактным микрометром получим

$$\left. \begin{aligned} m_x &= m_\varphi = \frac{\mu}{\sqrt{P_x}} = \frac{0,8''}{\sqrt{4}} = 0,40''; \\ m_y &= \frac{\mu}{\sqrt{P_y}} = \frac{0,8''}{\sqrt{8}} = 0,28''; \\ m_{\lambda'} &= \frac{1}{15} m_y \sec \varphi = 0,019^s \sec \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5.97)$$

Инструкция о построении геодезической сети требует, чтобы широты астрономических пунктов определялись со средней квадратической погрешностью не более $0,3''$, а долготы — не более $0,03^s$. При этом значения погрешностей вычисляются по внутренней сходимости результатов на пункте с учетом в долготе погрешности определения личной разности. Исключая из $m_{\lambda'}$ погрешность определения личной разности, получим

$$m_{\lambda'} = 0,02^s,$$

Для достижения указанных требований инструкции при определении пунктов Лапласа с достаточным запасом прочности рекомендуется производить наблюдения 6 серий по 12 звезд в каждой. При этом веса окончательно уравненных величин будут

$$\left. \begin{aligned} P_x &= 4 \cdot 6 = 24; \\ P_y &= 8 \cdot 6 = 48; \\ P_{\lambda'} &= P_y \cos^2 \varphi = 48 \cos^2 \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5.98)$$

Таким же образом можно получить средние квадратические погрешности определения широты и долготы по наблюдениям пар звезд на равных высотах. При этом для расчета средней квадратической погрешности определения времени (долготы) по одной паре звезд будем полагать, что среднее удаление звезд пары от первого вертикала составляет $10\text{--}15^\circ$, т. е. $P_y = 2 \sin^2 A_w = 1,9$.

Тогда для наблюдений с контактным микрометром получим

$$\begin{aligned} m_y &= \frac{0,8''}{\sqrt{1,9}} = 0,58''; \\ m_u &= \frac{0,8''}{15\sqrt{1,9}} \sec \varphi = 0,04^s \sec \varphi. \end{aligned} \quad (5.99)$$

Для вывода одного значения долготы пункта за двухчасовой промежуток между приемами сигналов двух соседних радиостанций можно произвести наблюдения 6—8 пар звезд. Средняя квадратическая погрешность одного вывода долготы (без учета погрешности определения личной разности) по наблюдениям 6 пар звезд будет

$$m_{\lambda'} \approx 0,017^s \sec \varphi. \quad (5.100)$$

Для одного вывода долготы $P_y = 1,9 \times 6 = 11,4$; $P_{\lambda'} = 11,4 \cos^2 \varphi$, т. е. вес почти в полтора раза больше, чем при наблюдениях серии из 12 звезд в одном альмукантарате.

Для определения долготы пункта Лапласа инструкция рекомендует производить наблюдения 6 серий по 6—8 пар звезд в каждой серии (6 независимых выводов долготы).

Для окончательного вывода долготы, считая по 6 пар звезд в каждой серии, будем иметь

$$\left. \begin{aligned} P_y &= 6 \times 11,4 = 68,4; \\ P_{\lambda'} &= 68,4 \cos^2 \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5.101)$$

Для расчета ожидаемой погрешности определения широты по наблюдениям пар звезд на равных высотах будем полагать, что среднее удаление пар звезд от меридиана составляет $20\text{--}25^\circ$, т. е. $P_x = 2 \cos^2 A_s = 1,7$. В этом случае средняя квадратическая погрешность определения широты по наблюдениям одной пары

звезд методом «Глаз — ухо» с помощью 2-секундного астрономического теодолита будет

$$m_{\varphi} = \frac{1''}{\sqrt{1,7}} = 0,8'' \quad (5.102)$$

Для определения широты пунктов 1 и 2 классов ($m_{\varphi} = 0,3''$) инструкция рекомендует с достаточным запасом прочности производить наблюдения 15 пар звезд. Ожидаемая погрешность окончательного вывода широты будет

$$M_{\varphi} = 0,2''.$$

Вес окончательного вывода широты составит

$$P_{\varphi} = 15 \times 1,7 = 25,5. \quad (5.103)$$

Сравнивая веса определения составляющих уклонения отвесной линии по наблюдениям пар звезд на равных высотах (5.101) и (5.103), найдем, что в соответствии с требованиями инструкции

$$\frac{P_y}{P_x} \approx 2,7, \quad (5.104)$$

т. е. практически уклонение отвесной линии в меридиане определяется в 1,65 раза грубее, чем в первом вертикале. Выше уже указывалось, что при окончательном выводе y это несоответствие частично компенсируется за счет случайных колебаний величины личного уравнения наблюдателя. Кроме того, по инструкции требуется равенство погрешностей

$$m_{\varphi} = m_{\lambda'}, \quad (5.105)$$

независимо от широты места. Для соблюдения этого требования необходимо следующее соотношение весов неизвестных

$$P_x = P_{\lambda'} \quad (5.106)$$

или

$$\frac{P_y}{P_x} = \sec^2 \varphi. \quad (5.107)$$

Изменение соотношения (5.107) в зависимости от широты можно представить в табл. 16.

Из табл. 16 следует, что практически соотношение весов (5.104) согласуется с требованием (5.105) или (5.107) только для широты $\varphi = 52,5^\circ$.

Т а б л и ц а 16

φ	0°	30°	40°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°
$\frac{P_y}{P_x}$	1	1,3	1,7	2,4	3,0	4,0	5,6	8,6	14,9	33,0

Для выполнения условий (5.105) и (5.107) в более высоких широтах требуются огромные, ничем не оправданные затраты сил и времени для определения долгот пунктов.

При наблюдениях с контактнм микрометром или с фотоэлектрической регистрацией звездных прохождений наиболее оправданным является требование равенства весов $P_x = P_y$, которое означает равенство средних квадратических погрешностей составляющих уклонения отвесных линий, т. е.

$$m_x = m_y \text{ или } m_\xi = m_\eta. \quad (5.108)$$

Составляющие уклонения отвесной линии определяются с одинаковой точностью во всех широтах.

ГЛАВА 6

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗЕНИТНЫМ РАССТОЯНИЯМ СВЕТИЛ

§ 42. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗЕНИТНЫМ РАССТОЯНИЯМ СВЕТИЛ В РАЗНЫХ ВЕРТИКАЛАХ (СПОСОБ СОМНЕРА—АКИМОВА)

1. Общие положения

Совместные определения x и y могут быть выполнены по измеренным зенитным расстояниям светил минимум в двух вертикалах, причем для получения обеих искомым величин с равным весом ($P_x = P_y$) наблюдения светил должны выполняться либо при равномерном их расположении по азимутам, либо в плоскостях двух любых взаимно перпендикулярных вертикалов симметрично относительно зенита. Теория способа совместного определения x и y (φ и λ или ξ и η) по измеренным зенитным расстояниям n светил в различных вертикалах является теорией наиболее общей задачи зенитальных способов астрономических определений, подробно изложенной в пятой главе.

Сущность данного способа состоит в следующем. Измеряются зенитные расстояния n светил ($n \geq 3$), равномерно расположенных по азимутам. Зенитные расстояния светил рекомендуется выбирать в пределах от 10 до 60° .

Для каждого наблюденного светила составляется уравнение поправок вида (5.28)

$$a\zeta + b_i x + c_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = 1.$$

Из решения n уравнений поправок (5.28) по методу наименьших квадратов находят значения условных составляющих отклонения отвесной линии x и y . Далее, по формулам (5.14)

$$\varphi = \varphi_0 + x; \quad \lambda' = \lambda_0 + \frac{y}{15} \sec \varphi$$

вычисляют астрономические широту и долготу пункта. В случае необходимости по формулам (5.17) можно вычислить астрономо-геодезические составляющие отклонения отвесной линии ξ и η .

Заметим, что эта же задача может быть решена с геодезическими координатами пункта B и L по формулам (5.15')

$$a\zeta + b_i \xi + c_i \eta + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = 1.$$

Оценка точности уравненных значений определяемых величин производится соответственно по формулам (5.31)—(5.33) и (5.35).

Необходимо отметить, что при наблюдениях светил на разных зенитных расстояниях на результаты измерений будут в полной мере оказывать влияние неучтенные систематические погрешности, действующие в функции зенитных расстояний наблюдаемых светил (остаточное влияние рефракции, неучтенные погрешности гнутия трубы прибора, систематические погрешности диаметров вертикального круга и т. д.).

Вследствие этого для точных астрономических определений данный способ не применяется. Для приближенных астрономических определений он имеет целый ряд преимуществ, так как позволяет в короткий срок по наблюдениям небольшого числа светил получить обе координаты φ и λ . Для наблюдений ночью способ не требует составления специальных эфемерид звезд. Для определений используются яркие звезды, выбор которых производится визуально. Вследствие этого способ является гибким: он позволяет производить наблюдения в трудных метеорологических условиях — наблюдать звезды в просветах облаков, что нельзя выполнить другими способами. При наличии эфемерид ярких звезд способ с успехом можно применять в дневное время. При этом в программу наблюдений можно включить также Солнце и планеты. Благодаря указанным достоинствам способ находит широкое применение при развитии опорных геодезических сетей специального назначения, в различных экспедиционных условиях; в авиационной и морской астрономии.

В зависимости от требуемой точности получения астрономических координат, применяемых приборов и методики измерений, определения астрономических пунктов данным способом обычно производятся из наблюдений двух-трех серий звезд по 6—8 звезд в каждой серии.

Расчет ожидаемой точности таких определений вытекает из формул оценки точности (5.32)—(5.35). В этих формулах значение средней квадратической погрешности единицы веса μ принимается из опыта наблюдений данным прибором (см. табл. 15), а значение весов уравненных значений неизвестных подсчитывается на основании формул (5.46) для случая равномерного распределения светил по азимутам.

Полагая, например, для наблюдений теодолитом У5 методом «глаз—ухо» $\mu = 1,8''$, число звезд в одной серии $n = 6 \cdot P_x = P_y = \frac{n}{2}$, получим:

$$m_x = m_\varphi = \mu \sqrt{\frac{1}{P_x}} = 1,8'' \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 1,0'';$$

$$m_y = \mu \sqrt{\frac{1}{P_y}} = 1,8'' \sqrt{\frac{1}{3}} = 1,0'';$$

$$m_\lambda = \frac{m_y}{15} \sec \varphi \approx 0,07^s \sec \varphi.$$

Следует заметить, что приведенные значения средних квадратических погрешностей дают характеристику точности по внутренней сходимости результатов наблюдений. Учитывая указанное выше действие систематических погрешностей измерения зенитных расстояний светил, действительная точность определений данным способом будет несколько ниже ожидаемой (полученной по априорным расчетам).

Идея способа совместного определения φ и λ была известна давно. Его разработка осуществлялась многими астрономами.

В мореходной астрономии, а также в другой специальной литературе он известен по имени английского моряка Сомнера. Однако следует заметить, что Сомнер предложил лишь графический метод обработки наблюдений зенитного расстояния Солнца на географической карте в проекции Меркатора (1843 г.). Эта же задача была решена несколько раньше русским моряком Акимовым (1839 г.).

2. Наблюдения

Общий порядок наблюдений в каждой серии состоит из:
приема сигналов времени 1-й радиостанции;
измерений зенитных расстояний n светил (6—8 светил);
приема сигналов времени 2-й радиостанции.

Перед наблюдениями теодолит выставляется на штативе или на столбе, тщательно горизонтируется и ориентируется в меридиане. Измерения зенитных расстояний светил можно производить как при двух, так и при одном положении вертикального круга прибора (КЛ или КП). Наблюдения, выполненные при двух положениях вертикального круга, будут при одинаковом числе светил несколько точнее наблюдений, выполненных при одном круге. Кроме того, при измерениях зенитного расстояния каждого светила, выполненных при двух кругах, можно не опасаться возможных изменений во времени места зенита прибора. Однако наблюдения и их обработка, выполненные при двух кругах, занимают значительно больше времени, чем соответствующие им наблюдения при одном круге. Поэтому за один и тот же промежуток времени в измерениях при одном круге можно произвести наблюдения значительно большего числа светил, чем при измерениях, выполненных при двух кругах. С учетом этого можно полагать, что обе методики измерений практически одинаковы по точности получаемых результатов.

При работе с современными высокоточными угломерными приборами можно рекомендовать следующую методику измерений зенитных расстояний светил (наблюдение при одном круге — КЛ):
наведение трубы теодолита на выбранное светило;
отсчет уровня при вертикальном круге;
наблюдение прохождений светила через три средние горизонтальные нити вблизи вертикального биссектора; при этом записы-

Теодолит У5 № 1217

Пункт *Ивановка* $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$, $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$ $Mz^\circ = 0^\circ 00' 00,0''$ Дата *25/26—VI—1975 г.* $i^{1/2} = (Л + П) - m$ $\tau = 3,60''$ $g = +0,1''$ Звезда α_{800} (345) $t_0^\circ = 19,7^\circ$ $B = 741,5$ мм

Хронометр	Уровень		Вертикальный круг		Горизонтальный круг А	Примечание	
	Л	П	и	микроскоп I			микроскоп II
15 ^h 02 ^m 05,5 ^s	12,0—32,6	+4,6	27° 30' 00"	31' 33"	205,5°		
27,5							00
50,5	12,0—32,6	+4,6	30 00	31 33			
$T_H = 15^h 02^m 27,83^s$	12,0—32,6	+4,60	27° 30' 46,5"	$\rho_0 = 30,26''$			
$\Delta T_a = -0,021^s \cos 27^\circ 31' =$			$i \frac{\tau}{2} = + 8,3''$				$\gamma = 0,9668$
$= -0,02^s$			$L = 27^\circ 30' 54,8''$				
$T_H + \Delta T_a = 15^h 02^m 27,81^s$			$Mz^\circ = 0 \ 0 \ 0,0$		$\rho = +0^\circ 0' 28,5''$		
			$\rho = 0 \ 00 \ 28,5$				
	$g \sin z = 0 \ 0 \ 0,0$						
		$z'_{изм} = 27^\circ 31' 23,3''$					

вают показания хронометра T_t , соответствующие моментам прохождения светила через указанные нити;
отсчеты уровня при вертикальном круге;
отсчеты вертикального лимба;
отсчет горизонтального лимба с точностью до десятой доли градуса ¹.

При ориентированном теодолите отсчет горизонтального лимба соответствует азимуту наблюдаемого светила. Если выбранное светило окажется в момент наблюдения в меридиане или вблизи от него, то визирование на светило осуществляется методом наведения средней горизонтальной нити под счет ударов хронометра. При этом производится последовательно три наведения. Для каждого наведения записывают показание хронометра, отсчеты уровня и отсчеты вертикального лимба. Отсчет горизонтального лимба записывается один раз для среднего наведения.

Наблюдения Солнца производят аналогичным образом. При этом для приведения наблюдений к центру Солнца визирование осуществляется на верхний и нижний края Солнца.

В начале, в середине и в конце наблюдений серии светил записывают показания барометра и термометра, необходимые для вычисления поправки за рефракцию. При вычислении зенитного расстояния Солнца, кроме влияния рефракции, учитывается суточный параллакс.

Примерная запись наблюдений светила в журнале представлена в табл. 17.

3. Обработка наблюдений

Вычисление наблюдений состоит из следующих операций: обработка приема радиосигналов времени, обработка журнала наблюдений, вычисление свободных членов уравнений поправок, решение системы уравнений поправок, вывод окончательных значений координат астрономического пункта и оценка точности.

Обработка приема радиосигналов координированного времени двух станций (до наблюдений и после наблюдений светил) выполняется по формулам и схеме, приведенным в § 22. Из обработки приема радиосигналов времени с предварительной долготой пункта λ_0 выводятся значения поправок хронометра u_0 относительно местного звездного времени в средний момент приема X и часовой ход хронометра ω .

¹ Отсчет горизонтального лимба производится в этом способе с целью последующего уверенного опознавания наблюдаемой звезды, а также для нахождения коэффициентов при неизвестных x и y в уравнениях поправок.

Приведем результаты обработки приема радиосигналов времени для рассматриваемого примера.

$$u_{0_1} = -3,569^s \text{ в момент } X_1 = 14^h 34,8^m$$

$$u_{0_2} = -3,163^s \text{ в момент } X_2 = 16^h 35,1^m$$

$$u_0 = \frac{u_{0_1} + u_{0_2}}{2} = -3,366^s \text{ в момент } X = \frac{X_1 + X_2}{2} = 15^h 35,0^m$$

$$\omega = \frac{u_{0_2} - u_{0_1}}{(X_2 - X_1)^h} = \frac{-3,163^s + 3,569^s}{2} = +0,203^s.$$

Обработка журнала наблюдений для каждого светила включает вычисление:

среднего момента наблюдения светила $T_H = \frac{\sum T_i}{n}$, где T_i — момент по хронометру, соответствующий прохождению светила через i -ю нить, n — число нитей;

наклона i оси уровня при вертикальном круге по формулам (4.6)—(4.8); $i'' = [(Л + П) - m] \frac{r''}{2}$;

среднего отсчета по вертикальному лимбу $L (R)$, исправленного поправкой за уровень $L = L' + i$, $R = R' + i$;

поправки за рефракцию $\rho = \rho_0 \gamma B$, где $\rho_0 = \mu \operatorname{tg} z'$ — средняя рефракция, выбираемая из раздела I таблиц 39 АТ по аргументу $z'_{\text{изм}}$ — видимому зенитному расстоянию. Величину γ выбирают из раздела II тех же таблиц по аргументу t° — температуре наружного воздуха во время наблюдения. Величину B выбирают из раздела III таблиц по аргументу B , мм (давление атмосферы);

поправки за гнутые трубы теодолита $\Delta z = g \sin z$; коэффициент g находится из специальных исследований прибора;

наблюденного зенитного расстояния светила по формулам

$$z_{\text{изм}} = L - M^{\circ}z + \rho + g \sin z;$$

$$z_{\text{изм}} = M^{\circ}z - R + \rho + g \sin z.$$

При наблюдениях Солнца для каждого наведения зенитное расстояние вычисляется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} z'_{\text{изм}} &= L - M^{\circ}z + \rho + g \sin z_{\odot} - \rho_{\odot} \sin z_{\odot} \pm R_{\odot}; \\ z_{\text{изм}} &= M^{\circ}z - R + \rho + g \sin z_{\odot} - \rho_{\odot} \sin z_{\odot} \pm R_{\odot}, \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

где ρ_{\odot} — горизонтальный суточный параллакс Солнца; R_{\odot} — видимый радиус Солнца.

В выводе среднего зенитного расстояния радиус Солнца можно не учитывать.

Вычисление свободных членов уравнений по поправкам производят по формуле

$$l_0 = z_{\text{выч}} - z'_{\text{изм}}, \quad (6.2)$$

где

$$\cos z_{\text{выч}} = \sin \varphi_0 \sin \delta + \cos \varphi_0 \cos \delta \cos t_0. \quad (6.3)$$

В формуле (6.3) φ_0 — предварительное (счислимое) значение широты пункта, t_0 — предварительное (счислимое) значение часового угла светила.

Часовой угол t_0 вычисляется со счислимым значением поправки хронометра u_0 , приведенной часовым ходом к моменту наблюдения по формуле

$$t_0 = T_H + \Delta T_{a_i} + u_0 + \omega(T_H - X) - \alpha, \quad (6.4)$$

где $\Delta T_{a_i} = -0,021^s \cos z$ — поправка за влияние суточной аберрации.

Для вычисления величин $z_{\text{выч}}$ с помощью арифмометра формулу (6.3) целесообразно преобразовать таким образом, чтобы избавиться в ней от двойного произведения. На основании (6.3) будем иметь

$$2 \cos z_{\text{выч}} = (\sin \varphi_0 \sin \delta + \cos \varphi_0 \cos \delta \cos t_0)(1 + \cos t_0) + (\sin \varphi_0 \sin \delta + \cos \varphi_0 \cos \delta \cos t_0)(1 - \cos t_0),$$

откуда

$$\cos z_{\text{выч}} = \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta)(1 + \cos t_0) - \cos(\varphi_0 + \delta)(1 - \cos t_0)]. \quad (6.5)$$

Если наблюдения светил производились при двух кругах, то свободный член l_0 , вычисленный по формуле (6.2) со средним моментом в приеме, необходимо исправить поправкой за ускорение движения светила по зенитному расстоянию

$$l = l_0 + \Delta l_v. \quad (6.6)$$

Поправка за ускорение Δl_v вычисляется по формуле (5.63). Примеры вычисления свободных членов приведены в табл. 18.

Составление и решение системы уравнений по поправкам. Для каждого наблюденного светила составляется уравнение поправок вида (5.28)

$$a\xi + b_i x + c_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = 1,$$

где коэффициенты при неизвестных представляют собой следующие величины: $a = -1$, $b = \pm \cos A_i$, $c_i = \pm \sin A_i$. Знак плюс перед коэффициентами b_i и c_i соответствует счету азимута A от точки Юга, знак минус — от точки Севера. Уравнение поправок можно решать как графическим, так и аналитическим методами.

Вычисление свободных членов уравнений поправок

$$l_i = z_{\text{выч}_i} - z'_{\text{изм}_i}, \quad l'_i = l_i \pm N$$

$$\cos z_{\text{выч}_i} = \frac{1}{2} [\cos \varphi_0 - \delta_i] (1 + \cos t_{0_i}) - \cos (\varphi_0 + \delta_i) (1 - \cos t_{0_i})]$$

Действия	Звезда	
	345	424
$T_H + \Delta T_a$	15 ^h 02 ^m 27,81 ^s	15 ^h 09 ^m 49,50 ^s
u_0	—3,37	—3,37
$\omega (T_H - X)$	—0,11	—0,09
s	15 02 24,33	15 09 46,04
α	14 14 04,99	17 33 20,30
t_0^h	0 48 19,34	—2 23 34,26
t_0^o	12° 04' 50,10"	—35° 53' 33,90"
φ_0	44 58 40,00	44 58 40,00
δ	19 21 51,64	12 35 01,78
$\varphi_0 - \delta$	25 36 48,34	32 23 38,22
$\varphi_0 + \delta$	64 20 31,64	57 33 41,78
$\cos (\varphi_0 - \delta)$	0,901781	0,844385
$1 + \cos t_0$	1,977854	1,810116
$\cos (\varphi_0 + \delta)$	0,432997	0,536393
$1 - \cos t_0$	0,022146	0,189884
$\cos z_{\text{выч}}$	0,886953	0,713291
$z_{\text{выч}}$	27° 30' 26,0"	44° 29' 38,0"
$z_{\text{изм}}$	27 31 23,3	44 30 41,6
l	— 57,3	— 53,6
$N_{\text{граф}}$	+ 70,0	+ 70,0
$l'_{\text{граф}}$	+ 12,7	+ 16,4
$N_{\text{анал}}$	+ 57,0	+ 57,0
$l_{\text{анал}}$	— 0,3"	+ 3,4"
A	205,5°	125,3°

Графический метод решения уравнений поправок может быть применен для уточнения предварительных координат пункта φ_0 и λ_0 , а также с целью проверки правильности вычисления свободных членов уравнений поправок и проверки наблюдений, для выявления в них грубых погрешностей.

Если требуемая точность получения координат пункта невысока и лежит в пределах 2", то графическое уравнение может считаться окончательным. Идея графического метода решения уравнений поправок состоит в следующем.

Уравнение поправок (5.28) есть уравнение первой степени относительно искомым величин x и y . С геометрической точки зрения оно представляет собой нормальное уравнение прямой. Действительно, положив $l_i - \zeta - v_i = -p_i$, получим уравнение

$$\pm \cos A_i x \pm \sin A_i y - p_i = 0, \quad (6.7)$$

которое и представляет собой нормальное уравнение некоторой прямой AB . В этом уравнении x и y — текущие координаты точки прямой, а p_i — величина перпендикуляра, опущенного из начала координат на прямую AB . С направлением оси x перпендикуляр составляет угол, равный азимуту A_i направления на светило (рис. 73).

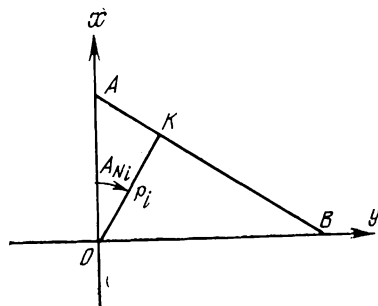


РИС. 73

Прямая AB , перпендикулярная к линии $OK = p_i$, называется линией положения, или сомнеровой линией. Такие линии положения (сомнеровы линии) строят для каждого наблюдаемого светила. Построения производят на миллиметровой бумаге. При этом с началом координат совмещается счислимое место наблюдения φ_0 и λ_0 . Вертикальная ось (см. рис. 73) совмещается с осью x , а горизонтальная — с осью y . Положительное направление оси x считается вверх (на север), а оси y — вправо (на восток).

Для каждого наблюдаемого светила производят следующие построения: при помощи транспортира намечают из начала координат линии, соответствующие азимуту светила A_i .

На проведенных лучах откладывают от начала координат отрезки, равные l_i в принятом масштабе m . Наиболее приемлемым масштабом является 1" в 4 мм ($m = 4$) или 1" в 5 мм ($m = 5$).

Если величины свободных членов l_i окажутся неподходящими для таких построений (либо слишком большими, либо слишком малыми), то ко всем свободным членам можно прибавить (или отнять) одну и ту же величину N'' . Таким образом, на проведенных лучах практически откладывают отрезки, равные $l'_i = l_i + N''$ в принятом масштабе m . Через концы отрезков (определяющие точки) проводят линии положения, перпендикулярные к лучам. В том случае, если величина l' отрицательна, ее надо откладывать в направлении, обратном направлению луча. Однако число N'' рекомендуется выбирать таким, чтобы величина l'_i для всех светил данной серии наблюдений была положительной.

В замкнутую фигуру, образованную пересечением линий положения, вписывают наиболее подходящую окружность (рис. 74). Координаты центра вписанной окружности, выраженные в секундах, будут представлять собой вероятнейшие значения определяемых величин x и y , а радиус окружности r , выраженный в секундах, без числа N'' , есть поправка ζ ко всем измеренным зенитным расстояниям светил за неверно принятое при вычислениях место зенита $M^{\circ}z$.

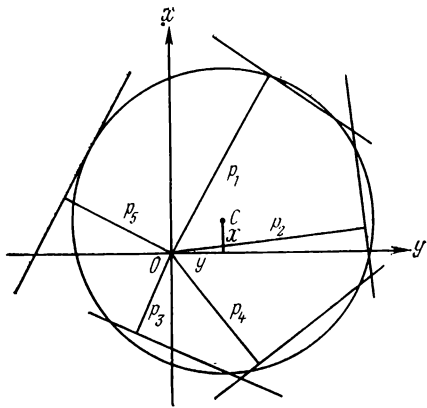


РИС. 74

Таким образом, уравненные значения неизвестных, снятые с графика, будут:

$$x'' = \frac{x, \text{ мм}}{m}; \quad y'' = \frac{y, \text{ мм}}{m};$$

$$\zeta'' = \frac{r, \text{ мм}}{m} \mp N''. \quad (6.8)$$

Поправки к численным координатам и к предварительному значению места зенита найдутся из соотношений:

$$\Delta\varphi'' = x''; \quad \Delta\lambda^s = \frac{y''}{15} \sec \varphi;$$

$$\Delta Mz'' = -\zeta'. \quad (6.9)$$

Уравненные значения координат и места зенита будут:

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi; \quad \lambda' = \lambda_0 + \Delta\lambda; \quad Mz = Mz^0 + \Delta Mz. \quad (6.10)$$

Окончательное значение долготы пункта с учетом поправки за лично-инструментальную разность

$$\lambda = \lambda' + \partial\lambda. \quad (6.11)$$

Оценку точности уравненных значений неизвестных производят по формулам (5.31—5.32):

средняя квадратическая погрешность единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[vv]}{n-3}},$$

средние квадратические погрешности определяемых величин

$$m = \sqrt{\frac{1}{P_\zeta}}; \quad m_\varphi = \mu \sqrt{\frac{1}{P_x}}; \quad m_{\lambda'} = \frac{\mu}{15} \sqrt{\frac{1}{P_y}} \sec \varphi;$$

$$m_\lambda = \sqrt{m_{\lambda'}^2 + m_{\partial\lambda}^2}.$$

Для графического метода уравнивания можно положить

$$[v^2] = [\Delta r^2], \quad \Delta r'' = \frac{\Delta r}{m}, \quad (6.12)$$

где $\Delta r = r - r_i$ — разность в миллиметрах между длиной радиуса вписанной окружности r и расстоянием r_i от линии положения до центра окружности; величины P_ζ , P_x и P_y при условии примерно равномерного расположения светил по азимутам могут

быть вычислены по формулам (5.46):

$$P = n, \quad P_x = \frac{n}{2}, \quad P_y = \frac{n}{2}.$$

Величины уклонений Δr позволяют судить о доброкачественности наблюдений, а также о правильности вычислений свободных членов уравнений поправок. В случае больших отклонений отдельных линий положений результаты наблюдений и вычислений соответствующих светил должны быть внимательно проверены. Пример графического уравнивания серии звезд показан на рис. 75.

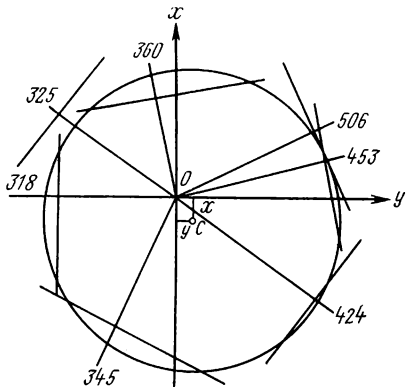


РИС. 75

Рассмотрим пример графического уравнивания результатов наблюдений (см. рис. 75):

1. Масштаб: $1''$ в 4 мм ($m = 4$).

2. Уравненные значения определяемых величин

$$x = -8,5 \text{ мм}, \quad x'' = -\frac{8,5}{4} = -2,1'', \quad \Delta\varphi = x = -2,1'';$$

$$y = +6,2 \text{ мм}, \quad y'' = +\frac{6,2}{4} = 1,55'', \quad \Delta\lambda^s = \frac{y}{15} \sec\varphi = +0,15^s;$$

$$\zeta = \frac{r}{m} \mp N = \frac{56}{4} - 70 = -56,0'', \quad \Delta Mz = -\zeta = +56,0'';$$

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi = 44^\circ 58' 40,0'' - 2,1'' = 44^\circ 58' 37,9'',$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda = 3^h 16^m 34,50^s + 0,15^s = 3^h 16^m 34,65^s;$$

$$Mz = M^0z + \Delta Mz = 0^\circ 00' 00,0'' + 56,0'' = 0^\circ 00' 56,0''.$$

3. Оценка точности

$$[\sigma^2] = [\Delta r^2] = 12,7, \quad \mu = \sqrt{\frac{[\sigma^2]}{n-3}} = \sqrt{\frac{12,7}{7-3}} = 1,8'';$$

$$m_\zeta = \mu \sqrt{\frac{1}{n}} = 0,7'', \quad m_\varphi = \mu \sqrt{\frac{1}{\frac{n}{2}}} = 1,0'',$$

$$m_\lambda = \frac{\mu}{15} \sqrt{\frac{1}{\frac{n}{2}}} \sec\varphi = 0,09^s.$$

Аналитический метод решения уравнений поправок применяется в случае, когда с помощью соответствующей методики наблюдений необходимо получить точность определений координат пункта выше чем $2''$,

Решение уравнений (5.28) осуществляется по методу наименьших квадратов в следующем порядке. Проверяют графическим методом, как указано выше, значения вычисленных свободных членов уравнений поправок и убеждаются в отсутствии грубых промахов в наблюдениях и вычислениях. Составляется таблица уравнений поправок и вычисляются коэффициенты и свободные члены нормальных уравнений.

Так как поправка ζ за неточно определенное место зенита, вообще говоря, не учитывается, то ее целесообразно исключить при уравнивании, применив для этой цели первое правило Шрейбера. Для этого к уравнениям поправок данной серии звезд добавляется суммарное уравнение вида

$$[a]\zeta + [b_i]x + [c_i]y + [l_i] = v \text{ с весом } P = \frac{1}{n}, \quad (6.13)$$

где n — число звезд, принятых в обработку.

Система нормальных уравнений при условии применения первого правила Шрейбера будет

$$\left. \begin{aligned} [Pbb]x + [Pbc]y + [Pbl] &= 0; \\ [Pbc]x + [Pcc]y + [Pcl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.14)$$

Решение системы нормальных уравнений (6.14) может быть произведено как путем последовательного исключения неизвестных по схеме Гаусса, так и обычным алгебраическим путем, с помощью определителей.

Т а б л и ц а 19

Аналитическое уравнивание по методу наименьших квадратов

У р а в н е н и я п о п р а в о к

$$a\zeta + b_i x + c_i y + l_i = v_i,$$

где $a = -1$, $b_i = -\cos A_{N_i}$, $c_i = -\sin A_{N_i}$

Номер звезды	A_{N_i}	a	b	c	l	S	Вес P
453	77,4°	-1	-0,22	-0,98	+1,7"	-0,50	1
345	205,5	-1	+0,90	+0,43	+0,3	-0,03	1
424	125,3	-1	+0,58	-0,82	+3,4	-2,16	1
325	308,3	-1	-0,62	+0,78	+0,1	-0,74	1
318	272,1	-1	-0,04	+1,00	-2,2	-2,24	1
360	349,3	-1	-0,98	+0,19	-3,5	-5,29	1
506	65,7	-1	-0,41	-0,91	+1,6	-0,72	1
Суммар- ное		-7	-0,79	-0,31	+0,80	-7,30	$-\frac{1}{7}$

Нормальные уравнения

	b]	c]	l]	s]
[Pb	+2,62	-0,24	+4,22	+6,60
[Pc		+4,28	-8,80	-4,76
[Pl			+34,11	+29,53
Контроль	-3,40	+7,96	-4,58	-0,02

Решение нормальных уравнений с помощью определителей

Нормальные уравнения

$$2,62x - 0,24y + 4,22 = 0;$$

$$-0,24x + 4,28y - 8,80 = 0.$$

Решение нормальных уравнений

$$\Delta = 11,1560 \quad \Delta_x = -15,9496 \quad \Delta_y = +22,0432$$

$$x = \frac{-15,9496''}{11,1560} = -1,43'' \quad y = \frac{22,0432}{11,1560} = +1,97''$$

$$P_x = \frac{11,1560}{4,28} = 2,60 \quad P_y = \frac{11,1560}{2,62} = 4,26$$

$$[v^2] = [Pl] + [Pbl] x + [Pcl] y$$

$$[v^2] = 34,11 - 6,05 - 17,34 = 10,72$$

Вывод вероятнейших значений

$$\varphi = \varphi_0 + x = 44^\circ 58' 40,0'' - 1,4'' = 44^\circ 58' 38,6''$$

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{y}{15} \sec \varphi = 3^h 16^m 34,50^s + \frac{1,97''}{15} 1,414 = 3^h 16^m 34,68^s$$

Оценка точности

$$\mu = \sqrt{\frac{10,72}{7-3}} = 1,64''; m_\varphi = m_x = \frac{1,6''}{\sqrt{2,60}} = 1,0''$$

$$m_y = \frac{1,6''}{\sqrt{4,26}} = 0,8''; m_{\lambda'} = \frac{m_y}{15} \sec \varphi = \frac{0,8''}{15} 1,414 = 0,08^s$$

При решении уравнений с помощью определителей уравненные значения неизвестных вычисляются по формулам

$$x = \frac{\Delta_x}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta_y}{\Delta}, \quad (6.15)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= [Pbb][Pcc] - [Pbc]^2; \\ \Delta_x &= [Pbc][Pcl] - [Pcc][Pbl]; \\ \Delta_y &= [Pbl][Pbc] - [Pbb][Pcl]. \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

Веса уравненных значений x и y найдутся из следующих выражений

$$P_x = \frac{\Delta}{[Pcc]}; \quad P_y = \frac{\Delta}{[Pbb]}. \quad (6.17)$$

Значение $[v^2]$ в этом случае вычислится по формуле

$$[v^2] = [Pll] + [Pbl]x + [Pcl]y. \quad (6.18)$$

Пример составления нормальных уравнений, а также их решение приведены в табл. 19, 20.

Оценка точности произведена по известным формулам метода наименьших квадратов (5.31)—(5.32).

§ 43. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗЕНИТНЫМ РАССТОЯНИЯМ ПАР ЗВЕЗД ВБЛИЗИ МЕРИДИАНА (СПОСОБ СТРУВЕ)

1. Теория способа

Для определения широты с максимальным весом выбор светил, на основании (5.40) или (5.49), необходимо производить в меридиане, равным числом по обе стороны от зенита. В этом случае

$$P_{x_{\max}} = [\cos^2 A] = n,$$

где n — число наблюдаемых звезд.

Определение широты по измеренным зенитным расстояниям можно производить из наблюдений серии или пары звезд. Для ослабления влияния систематических погрешностей, действующих на результаты измерений в функции зенитных расстояний, наблюдения и обработку целесообразно выполнять попарно, выбирая звезды в каждой паре по обе стороны от зенита, примерно на равных зенитных расстояниях ($|z_N - z_S| < 5-6^\circ$). Измерение зенитных расстояний звезд в паре можно выполнять при одном положении вертикального круга теодолита.

Чтобы ослабить влияние случайных погрешностей, наблюдение каждой звезды выполняется многократно. При этом наблюдения звезд выполняются, конечно, не в самом меридиане, а вблизи

него. Для измеренных зенитных расстояний каждой пары звезд будем иметь два уравнения поправок (5.28). Так как для звезд вблизи меридиана коэффициенты $c_i \approx 0$, то уравнения поправок примут вид

$$\left. \begin{aligned} a\xi + b_N x + l_N &= v_N, \\ a\xi + b_S x + l_S &= v_S, \end{aligned} \right\} \quad (6.19)$$

где $a = -1$, $b_{N,S} = \pm \cos A_{N,S}$, $l_{N,S} = z_{0_{N,S}} - z_{\text{изм}_{N,S}}$.

Условные зенитные расстояния z_{0_N} и z_{0_S} вычисляются со средними моментами наблюдений каждой звезды по стандартным формулам.

Для вычислений «вручную» с помощью арифмометра наиболее целесообразна формула (6.5)

$$\begin{aligned} \cos z'_{0_{N,S}} &= \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_{N,S})(1 + \cos t_{0_{N,S}}) - \\ &- \cos(\varphi_0 + \delta_{N,S})(1 - \cos t_{0_{N,S}})], \end{aligned}$$

в которой

$$t_{0_{N,S}} = T_{H_{N,S}} + u_0 + \omega(T_{H_{N,S}} - X) - \alpha_{N,S}, \quad (6.20)$$

$$T_{H_{N,S}} = \frac{\sum T_{i_{N,S}}}{k}, \quad (6.21)$$

k — число измерений зенитных расстояний каждой звезды.

Для вычислений часовых углов по формуле (6.20) поправка u_0 и ход хронометра ω определяются из приема радиосигналов времени.

Вычисленное со средним моментом наблюдений условное зенитное расстояние каждой звезды необходимо исправить поправкой за ускорение, т. е.

$$z_{0_i} = z'_{0_i} + \Delta z_{W_i}, \quad (6.22)$$

где в соответствии с формулами (5.58)—(5.60)

$$\begin{aligned} \Delta z_{W_i} &= \frac{15^2}{2k\rho} \frac{d^2 z}{dt^2} \sum \Delta T_i^2; \quad \Delta T_i = T_{H_i} - T_i; \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= m + n \operatorname{ctg} z. \end{aligned}$$

Коэффициенты m и n выбираются из таблиц прил. 1. При отсутствии таблиц для наблюдений в меридиане постоянные для данного пункта величины m и n вычисляются по формулам

$$m = \pm \frac{1}{2} \sin 2\varphi_0; \quad n = \cos^2 \varphi_0. \quad (6.23)$$

В первой формуле (6.23) знак «плюс» — для южных звезд, знак «минус» — для северных.

Для вычисления свободных членов уравнений поправок выводят средние зенитные расстояния каждой звезды

$$z'_{\text{изм}} = \frac{\sum z'_{\text{изм}}}{k}, \quad z_{\text{изм}} = z'_{\text{изм}} + \rho. \quad (6.24)$$

Решение уравнений поправок (6.19) по стандартным формулам дает следующие значения неизвестных для каждой пары звезд:

$$\xi = \frac{\Delta_{\xi}}{\Delta} = -\frac{[a]}{[aa]} = \frac{[l]}{2}, \quad (6.25)$$

$$x = \frac{\Delta_x}{\Delta} = -\frac{[bl]}{[bb]} \text{ с весом } P_x = 2. \quad (6.26)$$

При наблюдениях вблизи меридиана численные значения коэффициентов b практически можно положить

$$b_{N,S} = \pm 1,$$

где знак «плюс» — для южных звезд, знак «минус» — для северных. Учитывая численные значения коэффициентов $b_{N,S}$ и раскрывая выражения для x , получим

$$x = \frac{1}{2} [(z_{0N} - z_{\text{изм}N}) - (z_{0S} - z_{\text{изм}S})]$$

или

$$x = \frac{1}{2} [(z_{0N} - z_{0S}) - (z_{\text{изм}N} - z_{\text{изм}S})]. \quad (6.27)$$

Окончательное значение $x_{\text{ср}}$ из наблюдений n пар звезд, при равных весах, получают как простое среднее арифметическое, т. е.

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum x_i}{n} \text{ с весом } P_{x_{\text{ср}}} = 2n. \quad (6.28)$$

Уравненное значение широты будет

$$\varphi = \varphi_0 + x_{\text{ср}} \text{ с весом } P_{\varphi} = P_{x_{\text{ср}}} = 2n. \quad (6.29)$$

Оценку точности производят по внутренней сходимости результатов наблюдений на основании известных формул теории математической обработки геодезических измерений. Средняя квадратическая погрешность определения x по одной паре

$$\mu_x = \sqrt{\frac{[v_x v_x]}{n-1}}, \quad (6.30)$$

где v_x — уклонение значения x_i от среднего арифметического.

Средняя квадратическая погрешность окончательного значения

$$M_{\varphi} = M_x = \frac{\mu_x}{\sqrt{n}}. \quad (6.31)$$

В главе 5 было получено ожидаемое значение средней квадратической погрешности определения широты по одной паре звезд, наблюдаемой с помощью 2-секундного астрономического теодолита

$$m_{\varphi} = 0,9''.$$

Для определения широты со средней квадратической погрешностью $m_{\varphi} = 0,3''$ необходимо наблюдать с достаточным запасом прочности 12—15 пар звезд.

При указанной выше разности зенитных расстояний звезд в паре ($|z_N - z_S| < 6^\circ$) программу наблюдений можно составить из ярких звезд. Поэтому способ с успехом может быть применен для определения астрономических пунктов в высоких широтах, в условиях полярного дня.

Идея данного способа определения широты была известна давно. Разработка методики наблюдений с помощью вертикального круга и астрономического теодолита выполнена В. Я. Струве в сороковых годах XIX столетия.

2. Подготовка к наблюдениям. Составление рабочих эфемерид пар звезд

Для определения широты пунктов 1 и 2 классов применяют астрономический теодолит, имеющий 1-секундный или 2-секундный вертикальный круг.

Перед выездом на полевые работы производят исследования погрешностей диаметров вертикального лимба, эксцентриситета вертикального круга, правильности работы отсчетных приспособлений; определяют рен микроскопов-микрометров, цену деления уровня, цену оборота окулярного микрометра (на коллиматоре). В специальных лабораториях исследуются также барометр-анероид и термометр-пращ. Результаты исследований должны быть записаны в паспортах этих приборов.

В полевых условиях определяют цену оборота окулярного микрометра из наблюдений звезд в элонгации. На каждом пункте определяют рен микроскопов-микрометров вертикального круга. Для наблюдений теодолит устанавливается на столбе или штативе, тщательно горизонтируется и ориентируется в меридиане (с погрешностью, не превышающей 2—3'). При ориентировке диаметр 0—180° горизонтального круга устанавливается нулем на Север. Перед началом наблюдений определяют место зенита.

Для наблюдений заранее составляют рабочие эфемериды пар звезд, пользуясь каталогом средних мест звезд АЕ. В соответствии

с требованиями инструкции пары подбираются так, чтобы разность зенитных расстояний звезд, составляющих пару, не превышала 6° , промежуток времени между наблюдениями звезд в паре не превышал 20^m , а абсолютные зенитные расстояния звезд находились в пределах $10-55^\circ$. Указанные требования вытекают из анализа действия погрешностей измерения зенитных расстояний, рассмотренных в четвертой главе. Ограничения при выборе звезд по их величине диктуются условиями видимости во время предстоящих наблюдений, а также оптическими качествами трубы. Так, например, в условиях незаходящего Солнца теодолитами типа АУ2/10, ДКМ-3А можно наблюдать звезды до 3,5 величины. При выборе северных звезд одной из основных является Полярная звезда. Ее можно наблюдать не только вблизи моментов кульминаций, но и при любом другом часовом угле.

Подбор пар звезд основывается на формулах, определяющих зенитные расстояния светил в меридиане. При этом возможны два случая, в зависимости от выбора северной звезды пары в верхней или нижней кульминации.

1 - й с л у ч а й — с е в е р н а я з в е з д а в в е р х н е й к у л ь м и н а ц и и. Для этого случая имеем:

$$z_{m_N} = \delta_N - \varphi_0; \quad s_{m_N} = \alpha_N;$$

$$z_{m_S} = \varphi_0 - \delta_S; \quad s_{m_S} = \alpha_S.$$

Полагая $|z_{m_S} - z_{m_N}| \leq 6^\circ$ и $|\alpha_S - \alpha_N| \leq 20^m$, получим

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 - \delta_S &= \delta_N - \varphi_0 \pm 6^\circ; \\ \delta_S &= 2\varphi_0 - \delta_N \pm 6^\circ; \\ \alpha_S &= \alpha_N \pm 20^m. \end{aligned} \right\} \quad (6.32)$$

2 - й с л у ч а й — с е в е р н а я з в е з д а в н и ж н е й к у л ь м и н а ц и и. В этом случае имеем:

$$z_{N_{sp}} = 180^\circ - (\varphi_0 + \delta_N); \quad s_{N_{sp}} = \alpha_N \pm 12^h;$$

$$z_{m_S} = \varphi_0 - \delta_S; \quad s_{m_S} = \alpha_S.$$

Действуя таким же образом, как и в 1-м случае, получим

$$\left. \begin{aligned} \delta_S &= \delta_N - (180^\circ - 2\varphi_0) \pm 6^\circ; \\ \alpha_S &= \alpha_N \pm 12^h \pm 20^m. \end{aligned} \right\} \quad (6.33)$$

При подборе пар целесообразно за исходные брать северные звезды и к ним подбирать южные звезды, удовлетворяющие, соответственно, равенствам (6.32) и (6.33).

Когда за северную звезду выбирают Полярную, то парную ей южную звезду подбирают при условии

$$\delta_S = 2\varphi_0 - 90^\circ - 1 \pm 6^\circ. \quad (6.34)$$

Редукцию I выбирают из табл. 24 АТ, причем если часы звездного времени указаны в нижней части таблицы, то знак величины I

меняют на обратный. Зенитные расстояния и азимуты Полярной вычисляют для момента, отстоящего от момента наблюдения парной с ней южной звезды на 10^m .

Вычисление зенитного расстояния и азимута Полярной осуществляют с помощью таблиц высот и азимутов Полярной АЕ или табл. 24 и 27 АТ.

При составлении рабочих эфемерид полезно предвычислить углы упреждения

$$a \frac{t}{10},$$

где

$$a = 15t^m \cos \delta \operatorname{cosec} z \quad (6.35)$$

выбирают из табл. 38 АТ по аргументам δ и z . При составлении этой таблицы принято $t^m = 10^m$. Установка алидадной части теодолита с учетом угла упреждения позволяет симметрично расположить наблюдения относительно меридиана и облегчить обнаружение звезды в поле зрения трубы при наблюдениях в условиях незаходящего Солнца.

Азимуты звезд с учетом угла упреждения вычисляются по формулам (при отсчете азимутов от точки Севера):

для южных звезд

$$A_S = 180^\circ - a \frac{t}{10}; \quad (6.36)$$

для северной звезды в верхней кульминации

$$A_N = 0^\circ + a \frac{t}{10}; \quad (6.36')$$

для северной звезды в нижней кульминации

$$A_{NSP} = 360^\circ - a \frac{t}{10}. \quad (6.36'')$$

В формулах (6.36) величина t принимается обычно равной 3—4^m. Таким образом, формулы для составления рабочих эфемерид звезд в меридиане можно представить в виде табл. 21.

Т а б л и ц а 21

Южная звезда	Северная звезда	
	верхняя кульминация	нижняя кульминация
$z = \varphi_0 - \delta_s$ $A = 180^\circ - a \frac{t}{10}$ $s = \alpha$	$z = \delta_N - \varphi_0$ $A = 0^\circ + a \frac{t}{10}$ $s = \alpha$	$z = 180^\circ - (\varphi_0 + \delta)_N$ $A = 360^\circ - a \frac{t}{10}$ $s = \alpha \pm 12^h$

Номер пары	Номер звезды по АЕ N или S	Величина m	s^1	z	A	Кульминация
1	360 N	2,2	2h51 ^m	35° 40'	359° 36'	Нижняя
	77 S	3,0	3 05	29 52	178 54	
2	№ 4 N	2,1	3 11	19 08	0 54	Верхняя
	83 S	1,9	3 21	20 17	178 36	
3	369 N	3,5	3 24	50 53	359 30	Нижняя
	97 S	3,0	3 44	46 01	179 00	
4	399 N	2,9	4 23	48 23	359 30	Нижняя
	119 S	1,1	4 34	53 34	179 08	

¹ s — время для момента кульминации.

По формулам табл. 21 для подобранных пар звезд составляются рабочие эфемериды в порядке возрастания звездного времени. Эфемериды целесообразно оформлять в виде списка пар звезд, образец которого приведен в табл. 22.

3. Наблюдения

Общий порядок наблюдений состоит из:
 приема сигналов времени первой радиостанции;
 наблюдений k пар звезд;
 приема сигналов времени второй радиостанции.

Прием сигналов времени служит для вывода поправки хронометра и его хода. Передача поправки хронометра на момент наблюдения может производиться с погрешностью порядка $0,1^s$. В связи с этим промежуток между приемами сигналов времени двух радиостанций может составлять 4 ч.

Зенитные расстояния звезд могут измеряться как при одном, так и при двух положениях вертикального круга теодолита. Так как при выводе величины x по формуле (6.27) важно знать не абсолютные значения зенитных расстояний звезд, а разность зенитных расстояний звезд пары, то измерение z целесообразно производить при одном положении вертикального круга теодолита (КЛ или КП). Неизвестная поправка к приближенному значению места зенита исключится при этом в разности ($z'_{измN} - z_{измS}$).

В целях повышения точности наблюдений измерение зенитного расстояния каждой звезды производится многократно. При этом ряд последовательных наблюдений звезды располагают симметрично относительно меридиана, по возможности ближе к нему. Визирование на светило можно осуществлять с помощью как подвижной нити окулярного микрометра, так и одной из горизонтальных нитей сетки, действуя при этом наводящим винтом трубы

теодолита. В середине между наблюдениями звезд пары отсчитывают показания барометра и термометра.

Порядок наблюдения каждой пары звезд следующий:

за 3—4 мин до эфемеридного момента s устанавливают трубу на зенитное расстояние первой по времени звезды пары; при этом горизонтальная подвижная нить окулярного микрометра устанавливается в нуль-пункт гребенки;

верхнюю часть прибора устанавливают по эфемеридному значению азимута первой звезды (с учетом угла упреждения);

появившееся в поле зрения трубы изображение звезды устанавливают рядом с подвижной нитью микрометра и отсчитывают уровень при вертикальном круге;

при приближении звезды к средней вертикальной нити делают последовательно три наведения на звезду подвижной нитью окулярного микрометра под счет секундных ударов хронометра; при этом для каждого наведения записывают показание хронометра и отсчет по окулярному микрометру; тотчас после этого производят отсчеты вертикального круга, делая наведения на младший и старший штрихи лимба;

верхнюю часть теодолита устанавливают в меридиане (азимут 0 или 180°); подвижная нить микрометра устанавливается в нуль-пункт гребенки; при появлении звезды в поле зрения трубы ее изображение устанавливают рядом с подвижной нитью микрометра и берут отсчеты уровня; как только звезда приблизится к вертикальной нити, подвижную нить микрометра снова трижды наводят на звезду и трижды отсчитывают показания хронометра и микрометра, а затем вертикального круга;

поворачивают верхнюю часть теодолита на угол упреждения в направлении видимого суточного движения звезды и третий раз производят подобные наблюдения;

отсчитывают показания барометра и термометра;

по данным рабочих эфемерид устанавливают теодолит для наблюдения второй звезды пары; наблюдение второй звезды производят в таком же порядке, как и первой.

Если в качестве северной звезды пары наблюдают Полярную, то упреждения в установке прибора по азимуту не делают. Три серии наведений следуют здесь одна за другой. В остальном методика ее наблюдения остается такой же, как и для других звезд.

Во избежание влияния погрешностей за неточное определение цены оборота окулярного микрометра нельзя допускать, чтобы значение отсчетов по микрометру было больше одного оборота.

При наблюдениях без окулярного микрометра визирование на светило производится средней горизонтальной нитью, действуя при этом наводящим винтом трубы теодолита. В этом случае на каждую звезду пары делают по шесть наведений, располагающихся симметрично относительно меридиана. При каждом наведении записывают показание хронометра, отсчеты по уровню и вертикальному кругу.

Пример 1. $\varphi_0 = 69^\circ 58' 40''$ $\lambda = 4^{\text{h}} 35^{\text{m}}$ $u_0 = -20,0^{\text{s}}$
 Астрономический теодолит $2''/2''$ $\tau = 1,55''$ $i'' = [50 - (I + II)] \frac{\tau}{2}$
 Дата 12/13 сентября 1958 г.

Номер наведения	Хронометр	$\Delta T = T_i - T_{\text{CP}}$	Микрометр	Уровень Л, П	Вертикаль	
					I	II
1	2	3	4	5	6	7
399 — N						
1	$4^{\text{h}} 20^{\text{m}} 10^{\text{s}}$		10,198 ⁰⁶			
	20		198	33,5—18,1	$48^\circ 23' 17,9''$	18,6''
	30		189		18,1	18,9
Среднее	4 20 20,0	-193,3 ^s	10,195		$48^\circ 23' 18,00''$	18,75
2	$4 23 25$		10,087	33,6—18,2	$48^\circ 23' 27,8''$	28,2
	40		085		27,5	28,4
Среднее	4 23 40,0	+ 6,7	10,087		$48^\circ 23' 27,65''$	28,30
3	$4 26 30$		10,292	33,9—18,4	$48^\circ 23' 07,2''$	08,2
	40		295		07,0	08,7
Среднее	4 26 40,0	+186,7	10,295		$48^\circ 23' 07,10''$	08,45

$$T_{\text{CP}} = 4^{\text{h}} 23^{\text{m}} 33,33^{\text{s}} \quad \Sigma \Delta T^2 = 72 \ 267$$

$$\frac{15^2 \Sigma \Delta T^2}{2n\rho''} = 13,14''$$

$$B = 732,2 \text{ мм}$$

Номер наведения	Хронометр	$\Delta T = T_i - T_{\text{CP}}$	Микрометр	Уровень Л, П	Вертикаль	
					I	II
1	2	3	4	5	6	7
119 —						
1	$4^{\text{h}} 31^{\text{m}} 20^{\text{s}}$		9,634 ⁰⁶			
	40		610	33,0—17,2	$53^\circ 32' 38,9''$	40,9''
	32 0		614		39,2	41,3
Среднее	4 31 40,0	-173,3 ^s	9,619		$53^\circ 32' 39,05''$	41,10
2	$4 34 05$		9,905	32,8—17,1	$53^\circ 32' 07,5''$	08,7
	15		920		07,1	08,6
Среднее	4 34 15,0	-18,3	9,914		$53^\circ 32' 07,30''$	08,65
3	$4 37 35$		10,150	32,9—17,2	$53^\circ 31' 55,3''$	58,0
	55		165		57,7	57,6
Среднее	4 37 4 5,0	+191,7	10,162		$53^\circ 31' 55,50''$	57—80

$$T_{\text{CP}} = 4^{\text{h}} 34^{\text{m}} 33,33^{\text{s}} \quad \Sigma \Delta T^2 = 67 \ 883$$

$$\frac{15^2 \Sigma \Delta T^2}{2n\rho} = 12,34''$$

$T = 4^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ $\omega^{\text{h}} = +0,012^{\text{s}}$
 $R = 94,70''$ $Mz^\circ = 0^\circ 0' 10''$
 Наблюдатель Колупаев А. П.

новый круг	$\Delta M i = (M - 10^{06}) R$	i	$L = L' + i$	Рефракция $\rho = \rho_0 \gamma B$	$\Delta z_{\text{WN}} = \frac{15^2}{2n\rho} \Sigma \Delta T^2 \frac{d^2 z}{dt^2}$ $\frac{d^2 z}{dt^2} = m + n \text{ ctg } z$
$L' = \frac{1}{2}(I + II)$					
8	9	10	11	12	13
(2,9)					
$48^\circ 23' 18,38''$	+18,48''	-1,24''	$48^\circ 23' 35,62''$	$\rho_0 = +65,34''$ $\gamma = 0,9833$ $B = 0,9634$ $\rho = +61,90''$	$m = \frac{1}{2} \sin 2\varphi_0 = -0,3217$ $n = \cos^2 \varphi_0 = 0,1172$ $\text{ctg } z_N = 0,8876$ $\frac{d^2 z}{dt^2} = -0,2177$ $\Delta z_{\text{WN}} = \frac{15^2 \Sigma \Delta T^2}{2 \cdot 3 \cdot \rho''} \times$ $\times \frac{d^2 z}{dt^2} = -2,86''$
$48^\circ 23' 27,98''$	+8,25''	-1,40''	$48^\circ 23' 34,83''$		
$48^\circ 23' 07,78''$	+27,96''	-1,79''	$48^\circ 23' 33,95''$		

$$L_{\text{CP}} = 48 \ 23 \ 34,80$$

$$Mz = 0 \ 0 \ 10,00$$

$$z' = 48 \ 23 \ 24,80$$

$$\rho = +61,90$$

$$z_{\text{ИЗМ}} = 48 \ 24 \ 26,70$$

$$i_{\text{C}}^\circ = +14,8^\circ$$

новый круг	$\Delta M i = (M - 10^{06}) R$	i	$L = L' + i$	Рефракция $\rho = \rho_0 \gamma B$	$\Delta z_{\text{WS}} = \frac{15^2}{2n\rho} \Sigma \Delta T^2 \frac{d^2 z}{dt^2}$ $\frac{d^2 z}{dt^2} = m + n \text{ ctg } z$
$L' = \frac{1}{2}(I + II)$					
8	9	10	11	12	13
(1,1)					
$53^\circ 32' 40,08''$	+36,11''	-0,16''	$53^\circ 32' 03,81''$	$\rho_0 = +78,48''$ $\gamma = 0,9833$ $B = 0,9634$ $\rho = +74,34''$	$m = +0,3217$ $n = 0,1172$ $\text{ctg } z_S = 0,7386$ $\frac{d^2 z}{dt^2} = +0,4082$
$53^\circ 32' 07,98''$	-8,06''	+0,08''	$53^\circ 32' 00,00''$		
$53^\circ 31' 56,65''$	+15,36''	-0,08''	$53^\circ 32' 11,93''$		

$$L_{\text{CP}} = 53^\circ 32' 05,25''$$

$$Mz = 0 \ 0 \ 10,00$$

$$z' = 53 \ 31 \ 55,25$$

$$\rho = 74,34$$

$$z_{\text{ИЗМ}} = 53^\circ 33' 09,59''$$

$$\frac{15^2}{2 \cdot 3 \cdot \rho''} = \frac{1}{5500}$$

$$\Sigma \Delta T^2 = 67 \ 883$$

$$\Delta z_{\text{WS}} = +5,04''$$

Между парами звезд рекомендуется вертикальный круг переставлять на угол

$$\frac{180^\circ}{n},$$

где n — число пар звезд, необходимых для определения широты пункта.

Пример наблюдений пары звезд с помощью окулярного микрометра приведен в табл. 23.

4. Обработка наблюдений

Обработка журнала наблюдений производится чернилами и выполняется в следующем порядке.

Обрабатывается прием сигналов времени. С известной долготой пункта λ_0 выводятся значения поправок хронометра относительно местного звездного времени и часовой ход хронометра так же, как это показано при обработке приема радиосигналов времени в главе 2. Долгота пункта должна быть известна с погрешностью, не превышающей $0,1^s$.

Обработка наблюдений каждой пары звезд включает (см. образец журнала в табл. 23):

вывод средних моментов наблюдений северной и южной звезд пары по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum T_i}{n},$$

где n — число визирований на звезду.

При наблюдениях с окулярным микрометром вначале выводятся средние моменты $T'_{\text{ср}}$ для каждой из трех групп визирования

$$T'_{\text{ср}} = \frac{\sum T'_i}{3},$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum T'_{\text{ср}}}{3};$$

подсчет уклонений ΔT от средних моментов наблюдений каждой звезды

$$\Delta T_i = T_i - T_{\text{ср}};$$

при наблюдениях с окулярным микрометром значения ΔT_i подсчитываются для средних значений $T_{\text{ср}}$ каждой группы; одновременно подсчитывается произведение

$$\frac{15^2}{2n\rho} \sum \Delta T^2;$$

вывод средних значений отсчетов окулярного микрометра для каждой группы визирования

$$M'_i = \frac{\sum M}{3};$$

вывод средних отсчетов по вертикальному лимбу

$$L'_i = \frac{1}{2} (I + II),$$

где I — средний отсчет по первому микроскопу, II — средний отсчет по второму микроскопу (с учетом поправок за гип микроскопов);

подсчет поправок за окулярный микрометр по формулам (4.12);

подсчет поправок за уровень по формулам (4.7)—(4.9);

вывод значений отсчетов по вертикальному лимбу, исправленных поправками за окулярный микрометр и за уровень по формуле

$$L' = L'_i + \Delta M'_i + i;$$

вывод среднего отсчета по вертикальному кругу

$$L_{\text{ср}} = \frac{\sum L_i}{n};$$

вывод измеренных значений зенитного расстояния звезд пары по формулам

$$z'_{S, N} = L_{\text{ср}} - M^{\circ}z \text{ или } z' = M^{\circ}z - R_{\text{ср}};$$

для теодолитов, у которых подписи делений убывают по ходу часовой стрелки, формула вычисления измеренных зенитных расстояний следующая

$$z'_{S, N} = M^{\circ}z - L_{S, N} = R_{S, N} - M^{\circ}z;$$

величина места зенита должна быть известна с погрешностью, не превышающей $10''$;

вывод астрономической рефракции по формуле

$$\rho = \rho_0 \gamma B$$

с помощью табл. 39 АТ;

вычисление истинного зенитного расстояния звезд пары по формуле

$$z_{S, N} = z'_{S, N} + \rho_{S, N};$$

подсчет поправки за ускорение в зенитные расстояния звезд, вычисленные со средним моментом наблюдения $T_{\text{ср}}$ по формуле

$$\Delta z_W = \frac{15^2 d^2 z}{2n \rho'' dt^2} \sum \Delta T^2,$$

где для наблюдений в меридиане

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = m + n \operatorname{ctg} z;$$

$$m = \pm \frac{1}{2} \sin 2\varphi_0; \quad n = \cos^2 \varphi_0,$$

знак плюс перед m ставится для южных звезд, знак минус — для северных.

Вычисление широты производят в специальной ведомости по формулам (6.27)—(6.29). При этом величины $z_{0N,S}$ вычисляют по формулам (6.5), (6.20) со средним моментом наблюдения, а затем их исправляют поправками за ускорение движения звезды по зенитному расстоянию.

Если в качестве северной звезды наблюдалась Полярная в произвольном часовом угле t , то при вычислениях видимые координаты Полярной исправляются поправками за влияние суточной аберрации по формулам

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha &= 0,021^s \cos \varphi \sec \delta \sin t_0; \\ \Delta\delta &= 0,32'' \sin \varphi \sin \delta \sin t_0. \end{aligned} \right\} \quad (6.37)$$

При этом величину $0,021^s \cos \varphi \sec \delta$ выбирают из табл. 40 АТ и умножают на $\cos t_0$, а поправку $\Delta\delta$ для Полярной выбирают из табл. 41 АТ по аргументам φ и t_0 , причем, если $t_0 < 12^h$, то $\Delta\delta$ приписывают знак плюс, если $t_0 > 12^h$, то — минус.

Оценку точности производят по внутренней сходимости результатов наблюдений по формулам (6.30) и (6.31).

Пример вычислений широты приведен в табл. 24.

Вычисление широты

Т а б л и ц а 24

Действия	399N	119S
$T_{\text{ср}}$	4 ^h 23 ^m 33,33 ^s	4 ^h 34 ^m 33,33 ^s
u	-20,00	-20,00
$\omega (T_{\text{ср}} - X)$	0	0
s	4 23 13,33	4 34 13,33
α	16 23 24,65	4 33 33,66
t^h	-12 00 11,32	+0 00 39,67
t°	180° 02' 49,80"	0° 09' 55,05"
φ_0	69 58 40,00	69 58 40,00
δ	61 36 52,14	16 25 36,35
$\varphi_0 - \delta$	8 21 47,86	53 33 03,65
$\varphi_0 + \delta$	131 35 32,14	86 24 16,35
$\cos(\varphi_0 - \delta)$	0,989365	0,594107
$1 + \cos t$	0	1,999996
$\cos(\varphi_0 + \delta)$	-0,663825	0,062711
$1 - \cos t$	2,000000	0,000004
$\cos z_{\text{выч}}$	0,663825	0,594106
$z'_{\text{выч}}$	48° 24' 27,86"	53° 33' 03,85"
Δz_{Ψ}	-2,86	+5,04
$z_{\text{выч}}$	48 24 25,00	53 33 08,89
$z_{\text{изм}}$	48 24 26,70	53 33 09,59
l	-1,70"	-0,70"

$$x = \frac{-1,70'' + 0,70''}{2} = -0,50''$$

$$\varphi_i = 69^\circ 58' 39,50''$$

**§ 44. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ
МАЛЫМ РАЗНОСТЯМ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ ПАР ЗВЕЗД
В МЕРИДИАНЕ (СПОСОБ ТАЛЬКОТТА)**

1. Общие положения

Для определения широты с максимальным весом в данном способе измеряется разность зенитных расстояний и двух звезд в меридиане, одной к северу, другой к югу от зенита, примерно на равных зенитных расстояниях.

Для наблюдений подбирают такие пары звезд, разность зенитных которых не превышает рабочую часть поля зрения трубы прибора, т. е.

$$|z_S - z_N| < 20'.$$

В этом случае указанную малую разность зенитных расстояний северной и южной звезд каждой пары можно измерить с помощью окулярного микрометра трубы, не прибегая к отсчетам вертикального лимба. Действительно, пусть для измерения малой разности $z_S - z_N$ труба прибора поставлена на среднее зенитное расстояние пары

$$z_{cp} = \frac{z_S + z_N}{2}$$

и закреплена в этом положении зажимным винтом. На данное зенитное расстояние труба теодолита ставится по приближенному отсчету (с точностью до $1'$) вертикального лимба L'_0 .

Для фиксирования положения трубы по высоте, при наблюдениях северной и южной звезд пары, с трубой жестко скрепляется талькоттовский уровень, ось которого лежит в плоскости, параллельной плоскости вертикального круга. Так как при измерении разности зенитных расстояний звезд пары важно знать не абсолютные значения наклонов оси уровня, а разность этих наклонов, то применение такого уровня является наиболее целесообразным, ибо он одновременно учитывает малейшие изменения положения трубы по высоте.

Пусть в моменты прохождения звезд через бесколлимационную плоскость теодолита, ориентированного в меридиане, на них сделаны наведения подвижной нитью микрометра с соответствующими отсчетами по шкале микрометра M_S и M_N и определена разность наклонов оси уровня $(i_S - i_N) \frac{\tau}{2}$. Тогда половину измеренной разности зенитных расстояний северной и южной звезд можно представить в виде

$$\frac{1}{2} (z_S - z_N)_{изм} = \frac{1}{2} \left\{ [L'_0 + (M_S - 10^{06}) R] - [L'_0 + (M_N - 10^{06}) R] + (i_S - i_N) \frac{\tau}{2} + (\rho_S - \rho_N) \right\}$$

или

$$\frac{1}{2}(z_S - z_N)_{\text{изм}} = \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \frac{1}{2}(\rho_S - \rho_N), \quad (6.38)$$

где знак плюс перед скобками берется в том случае, когда отсчеты микрометра возрастают, и знак минус — когда они убывают с увеличением зенитного расстояния. Подставив значение полуразности зенитных расстояний в формулу (6.27), получим искомое выражение для x :

$$x = \frac{1}{2}(z_{0N} - z_{0S}) \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \frac{1}{2}(\rho_S - \rho_N), \quad (6.39)$$

где

$$\cos z'_{0S, N} = \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_{S, N})(1 + \cos t_{S, N}) - \cos(\varphi_0 + \delta_{S, N})(1 - \cos t_{S, N})].$$

Значения φ и ξ вычисляются на основании формул (5.14) и (5.17):

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 + x; \\ \xi &= x + (\varphi_0 - B). \end{aligned}$$

При значении часового угла звезды

$$|t| < 15^\circ$$

с погрешностью, не превышающей $0,03''$, величины $z_{0S, N}$ можно вычислять по формулам

$$(z_{0S} = \varphi_0 - \delta_S; z_{0N} = \delta_N - \varphi_0; z_{0N_{sp}} = 180^\circ - (\varphi_0 + \delta_N). \quad (6.40)$$

В этом случае формулы для вычисления x соответственно для наблюдений северной звезды пары в верхней и нижней кульминации будут

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2}(\delta_S + \delta_N) - \varphi_0 \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \\ &+ \frac{1}{2}(\rho_S - \rho_N); \end{aligned} \quad (6.41)$$

$$\begin{aligned} x &= 90^\circ - \varphi_0 - \frac{1}{2}(\delta_N - \delta_S) \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \\ &+ \frac{1}{2}(\rho_S - \rho_N). \end{aligned} \quad (6.42)$$

С целью повышения точности определения широты наблюдение каждой звезды пары производится многократно. При этом необходимо каждое наблюдение либо редуцировать на меридиан и затем брать среднее из всех наблюдений, либо производить вычисления со средними результатами, исправляя их поправкой за ускорение движения звезды по зенитному расстоянию.

В отличие от других способов, многократное наблюдение звезд в данном способе производится при неподвижном по азимуту положении трубы не у средней вертикальной нити, а в значительном удалении от нее. В этом случае, кроме поправки за ускорение, необходимо также учитывать поправку за наблюдение светил в стороне от бесколлимационной плоскости. Особенности учета и вычисления поправок за рефракцию, ускорение движения звезд и за искусственно создаваемую при наблюдениях коллимацию будут рассмотрены в пункте 2.

Идея способа определения широты по измеренной малой разности зенитных расстояний пары звезд в меридиане принадлежит датскому астроному П. Горребоу (1740 г.).

Практическая разработка способа и первые наблюдения с помощью зенит-телескопа с уровнем при трубе выполнены американским геодезистом А. Талькоттом в сороковых—пятидесятых годах XIX столетия. Результаты этой работы опубликованы в 1857 г. С тех пор способ стал называться способом Горребоу—Талькотта, а чаще его называют способом Талькотта. Такое же название носит и уровень, скрепляемый с трубой прибора.

Так как разность зенитных расстояний звезд пары не превышает $20'$, то в способе Горребоу—Талькотта наиболее полно исключаются погрешности за рефракцию, гнутие трубы и погрешности, связанные с отсчетами вертикального круга. Способ прост в наблюдениях и несложен в вычислениях. Ввиду этого он находит широкое применение для высокоточных определений широт пунктов во всех странах мира. В нашей стране он также рекомендуется инструкцией для определения широт пунктов Лапласа.

Из большого опыта наблюдений с помощью астрономического теодолита АУ $2''/10''$ средняя квадратическая погрешность определения широты по одной паре звезд равна $0,7—0,8''$. Для определения широты пункта со средней погрешностью $0,3''$ необходимо произвести наблюдения 10—12 пар звезд; для определений с той же точностью астрономическим теодолитом У5 16—18 пар звезд.

Наряду с указанными положительными сторонами способ Талькотта обладает также и некоторыми недостатками. К ним можно отнести:

влияние на точность определений широты систематических и случайных погрешностей хода винта микрометра, работа которым производится в широком диапазоне (до 10—12 оборотов);

изменение средней цены оборота винта микрометра со временем, а также с изменением внешних условий наблюдений; влияние этой погрешности частично ослабляется при совместном уравнивании широт на пункте за неверно принятую цену оборота винта;

при малой разности зенитных расстояний звезд в паре программу наблюдений приходится строить из слабых по блеску звезд (до 6-й звездной величины); вследствие этого способ почти нельзя применять в условиях полярного дня; для вычислений на ЭВМ требуется вводить в память машины обширный звездный каталог,

с общим числом звезд до 3000; при вычислениях «вручную» астроному самому приходится вычислять видимые места, затрачивая на это много времени.

С позиций общей теории определение широты по измеренной малой разности зенитных расстояний пар звезд возможно и целесообразно производить не только в меридиане, но и на удалении от меридиана до 30—40°. В этом случае пары можно составить из ярких звезд, а саму разность зенитных расстояний свети к минимуму. Краткое изложение такого варианта способа Талькотта будет дано в § 45.

2. Особенности вычисления поправок за рефракцию; ускорение движения звезд по зенитному расстоянию и за коллимацию; поправка за наклон подвижной нити микрометра

Поправка за рефракцию

В способе Талькотта наблюдаются пары звезд с близкими зенитными расстояниями и с малым промежутком времени между моментами их наблюдений. В этом случае дифференциальное изменение рефракции можно выразить как функцию средней рефракции, полагая влияние внешних условий (температуры и давления) одинаковым для обеих звезд пары. Средняя рефракция является функцией только зенитного расстояния, т. е.

$$\rho = f(z),$$

поэтому

$$\Delta\rho = \frac{d\rho}{dz} \Delta z.$$

Полагая

$$\Delta\rho = (\rho_S - \rho_N); \quad \Delta z = (M_S - M_N) R,$$

можно написать

$$\frac{1}{2} (\rho_S - \rho_N) = (M_S - M_N) \frac{R}{2} \frac{d\rho}{dz}. \quad (6.43)$$

Если Δz выразить в минутах, то $\frac{d\rho}{dz}$ есть изменение средней рефракции, соответствующее изменению $z_{cp} = \frac{1}{2} (z_S + z_N)$ на 1'. Для нахождения этого изменения, продифференцировав простейшую формулу рефракции

$$\rho = a \operatorname{tg} z,$$

получим

$$\frac{d\rho}{dz} = \frac{a}{\rho' \cos^2 z}.$$

Полагая $a = 60,40''$, будем иметь

$$\frac{d\rho}{dz} = \frac{60,40''}{3438} \sec^2 z = 0,0175'' \sec^2 z.$$

Подставив $\frac{d\rho}{dz}$ в формулу (6.43) и выразив Δz в минутах, получим окончательно

$$\delta\rho = \frac{1}{2}(\rho_S - \rho_N) = 0,0175'' \frac{(M_S - M_N) \frac{R''}{2}}{60} \sec^2 z_0. \quad (6.44)$$

Поправку за рефракцию в измеренную разность зенитных расстояний можно выбрать из табл. 35 АТ по аргументам $\Delta z'$ (до 0, 1') и z_{cp} (до 1''). Поправка $\delta\rho$ будет иметь тот же знак, что и разность $(M_S - M_N)$.

Поправка за ускорение зенитного расстояния звезды, вычисленного со средним моментом наблюдения

Одним из методов наблюдения звезд в способе Талькотта является метод наведений подвижной нитью микрометра на звезду под счет секундных ударов хронометра в произвольных малых часовых углах. Подробное описание этой методики будет дано в пункте 4 настоящего параграфа. Для получения x по формуле (6.39) вычисления величин $z_{0S, N}$ производятся с часовым углом звезды, вычисленным со средним моментом наблюдения

$$t = T_{cp} + u - \alpha,$$

где u — поправка хронометра в момент T_{cp} .

В этом случае величину $z_{0S, N}$ необходимо исправить поправкой за ускорение, вычисляемой по формуле (5.58)

$$\Delta z_W = \frac{15^2 d^2 z}{2n\rho dt^2} \sum \Delta T_i^2;$$

для наблюдений в меридиане $\frac{d^2 z}{dt^2} = \cos^2 \varphi (\pm \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{ctg} z)$

или

$$\left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right)_m = \pm \frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin z_m}. \quad (6.45)$$

В формуле (6.45) знак плюс — для верхней кульминации, знак минус — для нижней.

Другим методом наблюдений в способе Талькотта является метод наблюдений на постоянных вертикальных нитях. В этом методе ориентирование прибора в меридиане осуществляется с погрешностью, не превышающей 1,5—2'. Визирование на звезду подвижной нитью производится в моменты пересечения ею постоянных вертикальных нитей сетки. Отсчеты по хронометру не

производятся. Подробное описание этой методики дано в пункте 4 настоящего параграфа. Значения $z_{0S, N}$ вычисляются по формулам (6.40). Эти значения также необходимо исправить поправкой за ускорение. Для вывода формулы этой поправки выразим величины ΔT_i в формуле (5.58) через известные расстояния между нитями сетки

$$\Delta T_i^s = \frac{f_i''}{15 \cos \delta}. \quad (6.46)$$

После подстановки (6.46) в (5.58) получим

$$\Delta z_W = \frac{\sum f_i^2}{2n\rho'} W', \quad (6.47)$$

где

$$W' = \pm \frac{\cos \varphi_0}{\sin z_m \cos \delta}. \quad (6.48)$$

Поправка за влияние коллимации

Как при наблюдениях в произвольных малых часовых углах, так и на постоянных нитях многократные визирования подвижной нитью микрометра производятся в значительном удалении от средней вертикальной нити (до 10—12'). Таким образом, каждое визирование на звезду производится на искусственно создаваемой коллимации. В этом случае в соответствии с формулой (4.16) измеряемое зенитное расстояние нужно исправить поправкой за коллимацию. Полагая в формуле (4.16) $b = 0$, получим

$$\Delta z_{c_i} = \frac{c_i^2}{2\rho'} \operatorname{ctg} z'. \quad (6.49)$$

При каждом визировании вблизи меридиана в произвольных малых часовых углах величину текущей коллимации можно положить равной

$$f_i = c_i = 15 \Delta T_i \cos \delta, \quad (6.50)$$

где $\Delta T_i = (T_i - T_{\text{ср}})$ при симметричном расположении наблюдений относительно средней нити.

Влияние коллимации на среднее зенитное расстояние светила, выведенное из n наведений, будет

$$\Delta z_c = \frac{\sum \Delta z_{c_i}}{n} = \frac{\sum c_i^2}{2n\rho'} \operatorname{ctg} z = \frac{15^2 \cos^2 \delta \operatorname{ctg} z}{2n\rho'} \sum \Delta T_i^2.$$

Таким образом, получим

$$\Delta z_c = \frac{15^2}{2n\rho'} \cos^2 \delta \operatorname{ctg} z_m \sum \Delta T_i^2. \quad (6.51)$$

При наблюдениях на постоянных вертикальных нитях

$$c_i'' = f_i''$$

и, следовательно, для любой боковой нити

$$\Delta z_{c_i} = \frac{f_i''}{2\rho''} \operatorname{ctg} z. \quad (6.52)$$

Поправка в среднее зенитное расстояние

$$\Delta z_c = \frac{\sum f_i''}{2\rho''} \operatorname{ctg} z. \quad (6.53)$$

Поправка за влияние коллимации вводится со знаком «плюс» в измеренное зенитное расстояние или со знаком «минус» — в вычисленное (условное).

*Суммарное влияние поправки за ускорение
и поправки за коллимацию*

Зенитное расстояние светила, вычисленное со средним моментом наблюдения $T_{\text{ср}}$, исправленное поправками за ускорение и за коллимацию (для наблюдений в произвольных малых часовых углах), будет

$$z_{0_i} = z'_{0_i} + k, \quad (6.54)$$

где

$$z'_{0_i} = \arccos(\sin \varphi_0 \sin \delta + \cos \varphi_0 \cos \delta \cos t_0),$$

$$k = \Delta z = \Delta z_w - \Delta z_c = \frac{15^2}{2n\rho} \sum \Delta T_i^2 \left(\frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin z_m} - \cos^2 \delta \operatorname{ctg} z_m \right).$$

Полагая $\cos \varphi_0 = \cos(\delta_{S,N} \pm z_{mS,N})$, получим

$$\begin{aligned} \frac{\cos \varphi_0 \cos \delta}{\sin z_m} - \cos^2 \delta \operatorname{ctg} z_m &= \\ &= \frac{(\cos \delta_{S,N} \cos z_{mS,N} \mp \sin \delta_{S,N} \sin z_{mS,N}) \cos \delta_{S,N}}{\sin z_{mS,N}} - \\ &- \cos^2 \delta_{S,N} \operatorname{ctg} z_{mS,N} = \cos^2 \delta_{S,N} \operatorname{ctg} z_{mS,N} \mp \sin \delta_{S,N} \cos \delta_{S,N} - \\ &- \cos^2 \delta_{S,N} \operatorname{ctg} z_{mS,N} = \mp \sin \delta_{S,N} \cos \delta_{S,N} = \mp \frac{1}{2} \sin 2\delta_{S,N}. \end{aligned}$$

После простых преобразований будем иметь

$$k = \Delta z = \mp \frac{15^2}{2n\rho} \sum \Delta T_i^2 \sin \delta \cos \delta = \pm \frac{15^2}{4\rho n} \sum \Delta T_i^2 \sin 2\delta. \quad (6.55)$$

В формуле (6.55) знак плюс для северной звезды в верхней кульминации, знак минус — для южной звезды и для северной звезды в нижней кульминации.

В соответствии с формулой (6.39) поправка в полуразность вычисленных зенитных расстояний северной и южной звезд будет:

Для северной звезды в верхней кульминации

$$k_{cp} = + \frac{1}{2} (k_S + k_N);$$

для северной звезды в нижней кульминации

$$k_{cp} = + \frac{1}{2} (k_S - k_N).$$

Формула (6.39) с учетом суммарной поправки примет вид: для верхней кульминации

$$x = \frac{1}{2} (z'_{0N} - z'_{0S}) \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \\ + \frac{1}{2} (\rho_S - \rho_N) + \frac{1}{2} (k_S + k_N); \quad (6.56)$$

для нижней кульминации

$$x = \frac{1}{2} (z_{0N} - z_{0S}) \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \\ + \frac{1}{2} (\rho_S - \rho_N) + \frac{1}{2} (k_S - k_N). \quad (6.57)$$

Для наблюдений на постоянных вертикальных нитях суммарная поправка, на основании (6.47) и (6.53), будет

$$k = \Delta z = \Delta z_W - \Delta z_{cp} = \frac{\sum f_i^2}{2n\rho} \left(\frac{\cos \varphi_0}{\sin z_m \cos \delta} - \text{ctg } z_m \right);$$

полагая для южной звезды $\varphi_0 = \delta_S + z_{m_S}$,

для северной звезды $\varphi_0 = \delta_N - z_{m_N}$,

для северной звезды в нижней кульминации $\varphi_0 = 180^\circ - (z_N + \delta_N)$, получим

$$k = \Delta z_b = \pm \frac{\sum f_i^2}{2n\rho} \text{tg } \delta, \quad (6.58)$$

где правило знаков то же, что и для формулы (6.55).

Поправка в полуразность зенитных расстояний северной и южной звезд будет соответственно для положения северной звезды в верхней и нижней кульминации

$$k_{cp} = \frac{1}{2} (k_S + k_N) = \frac{1}{4n\rho} (\sum f_S^2 \text{tg } \delta_S + \sum f_N^2 \text{tg } \delta_N); \quad (6.59)$$

$$k_{cp} = \frac{1}{2} (k_S - k_N) = \frac{1}{4n\rho} (\sum f_S^2 \text{tg } \delta_S - \sum f_{Ncp}^2 \text{tg } \delta_N). \quad (6.60)$$

Формулы (6.41) и (6.42) с учетом суммарных поправок примут вид

$$x = \frac{1}{2} (\delta_S + \delta_N) - \varphi_0 \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \frac{1}{2} (\rho_S - \rho_N) + \frac{1}{2} (k_S + k_N); \quad (6.61)$$

$$x = 90^\circ - \varphi_0 + \frac{1}{2} (\delta_S - \delta_N) \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \frac{1}{2} (\rho_S - \rho_N) + \frac{1}{2} (k_S - k_N). \quad (6.62)$$

Заметим, что во многих курсах практической астрономии поправку за суммарное влияние ускорения движения звезды и текущей коллимации k называют поправкой за кризисную точную параллели. Вывод этой поправки производится из условий редуцирования наблюдений, выполненных вне меридиана, на меридиан, а не на вертикал прибора в средний момент наблюдений, как это сделано у нас.

Поправка за наклон подвижной нити микрометра

Многочисленные визирования на звезду подвижной нитью микрометра в способе Галькотта производятся в пределах значительной части поля зрения трубы. Поэтому необходимо с особой тщательностью устанавливать подвижную нить в горизонтальное положение, а при наблюдениях в произвольных малых часовых углах, кроме того, определять ее наклон из специальных наблюдений мира. При этом допустимая величина угла наклона нити не должна превышать $10'$

Наклон нити из наблюдений мира определяется в начале и в конце вечера следующим образом. Теодолит тщательно горизонтируют. Трубу грубо наводят правым концом подвижной нити на мир, установленную в горизонте, и берут с точностью до $10''$ отсчет по горизонтальному лимбу. Затем три раза наводят правый конец нити точно на мир и отсчитывают при этом по шкале микрометра. Вычисляют средний отсчет П. Далее поворачивают по азимуту алидаду на угол $30'$ таким образом, чтобы изображение мира переместилось на левый конец нити. Делают три наведения нити на мир и получают средний отсчет Л. Наклон нити в минутах градусной меры вычисляют по формуле

$$\psi = \pm 1,91 (\text{П} - \text{Л})^{\circ 6} R'', \quad (\text{А})$$

где знак «плюс» — для случая, когда отсчеты микрометра возрастают с увеличением z (КЛ для АУ $2''/10''$ и У 5); знак «минус» — когда отсчеты убывают с увеличением z (КП для АУ $2''/10''$ и У 5).

Положение прибора	Звезда южная	Звезда северная	
		Верхняя кульминация	Нижняя кульминация
Отсчеты микрометра возрастают с увеличением z	+	-	+
Отсчеты микрометра убывают с увеличением z	-	+	-

Поправку за наклон нити ΔM вводят в средний отсчет, образованный из отсчетов микрометра при наведении на звезду

$$\Delta M = \pm 0,0044 (T_{\text{ср. н}} - T_{\text{ср}}) \frac{\cos \delta \psi_{\text{ср}}}{R}, \quad (\text{Б})$$

где $\psi_{\text{ср}}$ — средний для вечера наклон нити в минутах дуги, полученный из наблюдений мира; $T_{\text{ср. н}}$ — отсчет по хронометру при пересечении звездой средней вертикальной нити; $T_{\text{ср}}$ — средний из отсчетов по хронометру, сделанных при наведениях на звезду.

Если $T_{\text{ср. н}} - T_{\text{ср}} \leq 2^{\text{s}}$, то поправка за наклон не вычисляется. Знак перед коэффициентом устанавливается на основании табл. 25.

Для наблюдений зенитной звезды поправка за наклон нити вычисляется по формуле

$$\Delta M = \pm 0,0044 \frac{(t_0 - t_{\text{ср}}) \cos \delta \cdot \psi_{\text{ср}}}{R}, \quad (\text{В})$$

где t_0 — среднее значение часового угла звезды, вычисленное для двух положений прибора; $t_{\text{ср}}$ — средний часовой угол звезды для каждого положения.

Знак перед коэффициентом в формуле (В) берется таким же, как для поправки K за кривизну параллели (6.55).

Подробное описание методики определения и учета наклона подвижной нити дано в специальном бюллетене ЦНИИГАиК [66].

3. Подготовка к наблюдениям. Составление рабочих эфемерид пар звезд

Для определения широты способом Талькотта применяют зенит-телескоп или астрономический теодолит, имеющий точный талькоттовский уровень (с ценой деления 1,5—2" на 2 мм) и окулярный микрометр с ценой оборота винта порядка 90—120". Вертикальный и горизонтальный круги прибора могут быть грубыми, с точностью отсчета до 30".

Перед выездом на работу исследуют уровень на экзаменаторе по способу проф. Васильева, определяют из наблюдений коллима-

тора цену оборота окулярного микрометра, исследуют периодические погрешности хода винта микрометра, а также правильность вращения верхней части прибора вокруг вертикальной оси. В процессе регулировки вертикальной оси добиваются такого положения, чтобы пузырек талькоттовского уровня горизонтированного прибора не уходил от середины более чем на одно-два деления при положении прибора в разных азимутах.

В полевых условиях определяют цену оборота окулярного микрометра из наблюдений звезд в элонгации, цену деления талькоттовского уровня по способу Комстока, расстояния между нитями сетки из наблюдений звезд в меридиане. Перед работой на каждом пункте проверяют и исправляют, если нужно, коллимационную ошибку для средней вертикальной нити ($|c| \leq 1'$), место зенита ($|Mz| \leq 1'$), правильность установки в горизонтальное положение подвижной нити микрометра по методу, изложенному в пункте 2.

Для наблюдений пар звезд прибор устанавливается на столбе или штативе, тщательно горизонтируется с помощью талькоттовского уровня. Ориентировка в меридиане диаметра $0-180^\circ$ горизонтального круга осуществляется с погрешностью, не превышающей $1-2'$. Такое ориентирование выполняется с учетом коллимационной ошибки прибора по местному предмету, азимут направления на который определен одним из приближенных способов с предельной погрешностью $1'$.

Перед наблюдениями заранее составляют рабочие эфемериды пар звезд на заданный период времени.

Принципиально подбор пар звезд в способе Талькотта основан на тех же формулах, что и в способе Струве (6.32) и (6.33). Различие состоит только в допустимой величине вычисленного значения разностей зенитных расстояний и прямых восхождений звезд пары. В соответствии с требованиями инструкции, основанными на действии погрешностей измерений зенитных расстояний светил, при подборе пар Талькотта установлены следующие допуски:

$$\frac{1}{2}(z_S + z_N) \leq 50^\circ; \quad |z_S - z_N| \leq 16'; \quad 3^m < |\alpha_S - \alpha_N| \leq 15^m;$$

общая программа наблюдений пар Талькотта на пункте должна быть подобрана так, чтобы алгебраическая сумма разностей зенитных расстояний южных и северных звезд не превышала $30'$, блеск звезд не должен быть ниже $6,0$ звездной величины.

Пользуясь каталогом с достаточно большим количеством звезд, например Каталогом 2957 ярких звезд со склонениями от -10° до $+90^\circ$ (каталогом геодезических звезд КГЗ-2), по формулам (6.32) и 6.33) нетрудно подобрать пары звезд Талькотта, удовлетворяющие указанным требованиям инструкции. На основании приведенных простых формул и допусков можно составить алгоритм и программу подбора и вычислений эфемерид пар звезд на ЭВМ.

Сотрудниками ГАО АН СССР и ЦНИИГАиК под руководством Д. Д. Положенцева были составлены рабочие эфемериды [65], основанные на Каталоге 2957 звезд; они содержат 20154 пары, считая за пары также и зенитные звезды. Среднее число пар в эфемериде с разностью $\Delta z \leq 16'$, которые можно наблюдать в течение одного часа, равно 9.

Подробное описание и пользование эфемеридами дано в пояснениях к рабочим эфемеридам способа Талькотта.

4. Наблюдения

Измерение разности зенитных расстояний звезд пары в способе Талькотта можно производить двумя равноценными по точности методами:

из наблюдений звезд в произвольных малых часовых углах; из наблюдений звезд на постоянных вертикальных нитях.

Оба эти метода имеют свои характерные особенности как в наблюдениях, так и в вычислениях, поэтому рассмотрим их в отдельности.

Наблюдения звезд в произвольных малых часовых углах.

Общий порядок наблюдений состоит из:

приема сигналов времени первой радиостанции;

наблюдений пар звезд;

приема сигналов времени второй радиостанции.

Из приема сигналов времени с известной долготой пункта выводятся значения поправок хронометра и его часового хода. Передача поправки хронометра на момент наблюдения должна производиться с погрешностью, не превышающей $0,1^s$.

Наблюдения звезд рекомендуется производить при таком положении прибора, когда головка винта окулярного микрометра направлена вверх. Эта рекомендация исходит из следующих соображений: рамка микрометра с подвижной нитью действием пружины оттягивается от головки микрометра к другому концу винта; при положительном вращении винта, которым, как известно, необходимо заканчивать наведение нити на звезду, чтобы при этом сжимать пружину, последняя содействует оттягиванию рамки с нитью от головки микрометра. Если же головка винта направлена вниз, то на пружину действует масса винта с головкой; на такую нагрузку сила пружины, вообще говоря, не рассчитана, и оттягивание рамки от головки может оказаться не полным, вследствие чего могут возникнуть дополнительные погрешности измерений.

Порядок наблюдений каждой пары звезд в произвольных малых часовых углах следующий:

За 3—4 мин до момента кульминации первой звезды труба теодолита ставится на среднее зенитное расстояние пары, верхняя

Теодолит У5 № 1231 $\varphi_0 = 55^\circ 07' 15,0''$ $\lambda_0 = 2^h 30,0^m$

Хронометр № 450

Цена деления талькоттовского уровня $\tau = 2,090''$ $(i_S - i_N) \frac{\tau}{4} = [(Л + П)_S - (Л + П)_N] \frac{\tau}{4}$.Цена оборота окулярного микрометра $R = 137,0''$

Отсчеты по шкале микрометра убывают с увеличением зенитного расстояния звезды

Дата 19/20 июня 1960 г. Пара № 7 КЛ $z_{cp} = 16^\circ 20'$ $\delta_N = 71^\circ 19'$ $\delta_S = 38^\circ 44'$

Номер наведения	Звезда № 2207N $n = 4,2$ $s_N = 18^h 21^m$				Звезда № 2237S $m = 0,1$ $s_S = 18^h 36^m$			
	Хронометр	ΔT $\Sigma \Delta T^2$	Уровень (Л + П) _N	Микрометр m_N	Хронометр	ΔT $\Sigma \Delta T^2$	Уровень (Л + П) _S	Микрометр
1	18 ^h 20 ^m 45 ^s	-42 ^s	25,0—35,0	5 320 ⁰⁶	18 ^h 34 ^m 52 ^s	-37	20,3—31,0	10,028 ⁰⁶
2	21 05	-22		319	35 11	-18		033
3	21 27	0		313	35 30	+1		40
4	21 48	+21		305	35 46	+17		50
5	22 08	+41	25,1—35,1	300	36 05	+36	20,5—31,2	61
Среднее	18 ^h 21 ^m 26,6 ^s $u = +10,0^s$ $\alpha = 18^h 21^m 24,0^s$ $t = 0^h 0^m 12,6^s$	4370	60,10 $(i_S - i_N)^{1/2} = -8,60^{1/2}$ $(i_S - i_N) \frac{\tau}{4} = -4,49''$	5,3114 $(m_S - m_N)^{06} = 4,7310^{06}$	18 35 28,8 $u = +10,0$ $\alpha = 18^h 35^m 37,6^s$ $t = 0^h 00^m 01,2^s$	3279	51,50 $(m_S - m_N)^{06} = 4,7310^{06}$ $(m_S - m_N)^{06} \frac{R''}{2} =$ $= 5' 24,07''$	10,0424 $(i_S - i_N) \frac{\tau}{4} = -4,49''$

$$\frac{15^2}{20\rho''} = \frac{1}{18\ 335} \sin 2\delta_N = 0,6070 \sin 2\delta_S = 0,9762$$

$$k_N = 0,14'' \quad k_S = 0,17''$$

$$\frac{\Delta\rho}{\Sigma} = \frac{+0,10''}{5' 19,68''}$$

$$\frac{1}{2} (k_S + k_N) = 0,15''$$

часть прибора устанавливается по азимуту на отсчет 0 или 180° ориентированного горизонтального круга в зависимости от того, на Севере или на Юге будет происходить кульминация, с помощью закрепительного винта талькоттовский уровень скрепляется с трубой, при этом защелка прилива винта уровня откидывается; действуя элевационным винтом, пузырек талькоттовского уровня выводится на середину;

при появлении звезды в рабочей части поля зрения трубы (при ее приближении к вертикальным нитям сетки) отсчитывают талькоттовский уровень;

сразу после записи отсчетов уровня наблюдатель берет счет секундных ударов хронометра и под любой из ударов наводит подвижную нить микрометра на звезду; при этом записывают показание хронометра до целых секунд и отсчет по шкале микрометра до тысячных долей оборота; таких наведений на звезду при ее прохождении через рабочую часть поля зрения трубы делают пять, причем желательно их расположить симметрично относительно средней вертикальной нити; для учета наклона подвижной нити среднее наведение рекомендуется производить в момент пересечения звездой средней вертикальной нити (с точностью 1^s);

заканчивают наблюдение звезды вторичными отсчетами талькоттовского уровня;

после наблюдения первой звезды поворачивают верхнюю часть прибора ровно на 180° и наблюдают вторую звезду пары в таком же порядке, как и первую.

Наблюдатель должен четко уяснить, что при измерении малой разности зенитных расстояний звезд пары взаимное положение визирной оси трубы и оси талькоттовского уровня должно оставаться неизменным. Поэтому после первого отсчета уровня при наблюдении первой звезды и до последнего отсчета уровня, при наблюдении второй звезды пары, ни в коем случае нельзя касаться элевационного винта уровня, а также оправы уровня и зрительной трубы. Вращение винта окулярного микрометра при наблюдениях звезд должно выполняться легко и плавно, без резких движений и нажима.

В табл. 26 приведена выписка из журнала наблюдений способом Талькотта в произвольных малых часовых углах ¹.

Наблюдения звезд на постоянных вертикальных нитях

При наблюдениях на постоянных нитях прием радиосигналов времени не обязателен. Поправку часов относительно местного звездного времени нужно знать с точностью 1^m лишь для того, чтобы определить, когда наступит момент кульминации той или

¹ Пример заимствован из Трудов ЦНИИГАиК, вып. 148.

иной звезды, с тем чтобы подготовиться к ее наблюдениям. Наблюдения звезд следует производить при таком положении прибора, когда головка винта окулярного микрометра направлена вверх.

Ориентирование прибора в меридиане производится особо тщательно по местному предмету, азимут которого определен с погрешностью, не превышающей $1'$.

Перед наблюдениями необходимо проверить и, если нужно, исправить коллимационную ошибку для средней вертикальной нити.

Коллимационная ошибка должна быть не больше $30''$. В астрономических теодолитах типа АУ $2''/10''$ и У5 исправление большой коллимационной ошибки можно производить крепежными винтами трубы, в необходимых случаях подкладывая под фланец трубы тонкую металлическую фольгу. Необходимо также проверить место зенита и горизонтальность подвижной нити микрометра.

Общий порядок наблюдения пар звезд такой же, как и при наблюдениях в произвольных малых часовых углах. Отличие составляет лишь методика наведения на звезду подвижной нитью микрометра. При наблюдениях наведение на звезду подвижной нитью микрометра производится в моменты пересечения ею постоянных вертикальных нитей. При этом хронометр не отсчитывается и во время наблюдения звезды им не пользуются.

Так как южные и близзенитные звезды имеют большую азимутальную скорость в видимом суточном движении, то их наблюдают обычно через нить; северные звезды, у которых скорость изменения азимута меньше, наблюдают на пяти средних нитях. Если сетка постоянных вертикальных нитей имеет вид, изображенный на рис. 76, то южную звезду наблюдают на 1, 3, 5, 7 и 9 нитях, а северную — на 3, 4, 5, 6 и 7 нитях.

В эфемеридах способа Талькотта [65] иногда вместо двух звезд, составляющих пару, дается одна звезда. Это означает, что данная звезда кульминирует вблизи зенита места наблюдения (зенитная звезда). Наблюдение такой звезды заменяет наблюдение пары звезд. В этом случае трубу устанавливают на отсчет $z_0 = 0^\circ$, и звезду наблюдают на трех крайних нитях. Затем алидадную часть прибора быстро поворачивают на 180° и во втором положении прибора (при другом круге) наблюдают на этих же нитях.

По аналогии с парами звезд необходимо указать, при каком положении круга (КП, КЛ) и какая звезда (N, S) наблюдалась. Зная величину склонения, сначала устанавливают — к северу

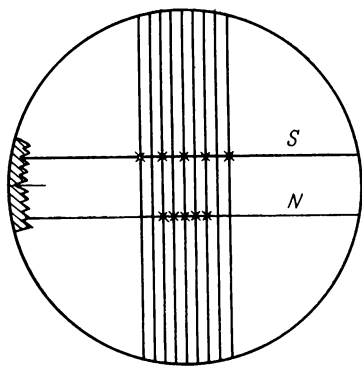


РИС. 76

Теодолит АУ 2"/10" № 10051

$$\tau = 1,500'' \quad R = 115,00''$$

Сетка имеет 7 вертикальных нитей. Наблюдения северных звезд производилось на 2, 3, 4, 5 и 6, и южных — на 1, 2, 4, 6 и 7 нитях. Расстояния боковых нитей от средней следующие:

1 нить	235''	5 нить	67''
2 »	120	6 »	121
3 »	66	7 »	237

$$F_S = \frac{\sum f_S^2}{20\rho''} = 0,034'' \quad F_N = \frac{\sum f_N^2}{20\rho''} = 0,009'' \quad \varphi_0 = 43^\circ 37' 55,0'' \quad \lambda_0 = 3^h 06,0^m$$

Дата 24/25 июля 1970 г. Пара № 1 КЛ $z_{cp} = 2^\circ 23'$ $\delta_S = 41^\circ 16'$ $\delta_N = 46^\circ 01'$

Номер наведения	Звезда № 1356S $m = 5,8$ $s_S = 17^h 32^m$			№ 1363N $m = 4,1$ $s_N = 17^h 38^m$		Σ	$k = \frac{1}{2} (k_S + k_N)$
	Микрометр m_S	Уровень		Микрометр m_N	Уровень		
1	9,555 ⁰⁶	17,0—34,5	$(i_S - i_N)^{1/2} = -2,55$	11,010 ⁰⁶	18,0—35,4	$(m_S - m_N) \frac{R}{2} = -1' 23,17''$	$\text{tg } \delta_S = 0,877$
2	558			10,996		$(i_S - i_N) \frac{\tau''}{4} = -0,96''$	$\text{tg } \delta_N = +1,037$
3	550			996		$\Delta\rho'' = +0,03''$	
4	562			11,005			
5	551	16,8—34,2	$(m_S - m_N)^{06} = -1,4464$	001	18,4—35,8		
Среднее	9,5552	51,25		11,0016	53,80	$\Sigma = -1' 24,10''$	$\frac{1}{2} (k_S + k_N) = -0,04''$

Дата 24/25 июля 1970 г.

Пара № 2 (КП)

 $z_0 = 0^\circ 0'$ Продолжение табл. 27
 $\delta = 43^\circ 46'$

(Зенитная звезда)

Номер наве- дения	№ 1710N, $m = 3,9$ $s = 21^h 03^m$		$(i_S - i_N)^{A/2}$ $(m_S - m_N)^{об}$	№ 1710S, $m = 3,9$ $s_S = 21^h 05^m$		Σ	$k = \frac{1}{2} (k_S + k_N)$
	Микро- метр m_N	Уровень (Л, П)		Микро- метр m_S	Уровень (Л, П)		
1	6,073 ^{об}	12,0—29,5	$m_S - m_N = +8,7430^{об}$	14,812 ^{об}	15,0—32,5	$(m_S - m_N) \frac{R''}{2} =$ $= 8' 22,72''$	$\operatorname{tg} \delta = 0,958$
2	065			817		$(i_S - i_N) \frac{\tau''}{4} = 2,08$	$F = +0,0600$
3	078		$(i_S - i_N)^{A/2} = +5,55$	816		$\Delta\rho = 0,14$	
4							
5		12,3—29,7			14,8—32,3		
Среднее	6,0720	41,75		14,8150	47,30	$\Sigma = +8' 24,94''$	$k = +0,06''$

или к югу от зенита происходит верхняя кульминация звезды (звезда N или S), а затем определяют круг, при котором производятся наблюдения. Если, например, южную звезду пары Талькотта наблюдают при положении «окуляр восток» (ломаная труба), то зенитной звезде, если она по склонению южная, при положении окуляра на восток приписывают КП, а наблюдениям индекс S ; при втором положении прибора наблюдениям этой звезды приписывают индекс N .

В табл. 27 приведены выписки из журнала наблюдений по способу Талькотта на постоянных нитях пары звезд и зенитной звезды.

5. Вычисление широты

Вычисление x (φ , ξ) при наблюдениях в произвольных часовых углах производят по формулам (6.56) и (6.57). При этом величины z_S и z_N вычисляют по одному из вариантов формулы косинуса зенитного расстояния (1), (6.5) со средним моментом наблюдения звезды. Если часовые углы звезд по абсолютному значению меньше 15^s , то вычисление величины z'_0 можно производить по формуле (6.40). В случае выполнения этого условия для обеих звезд пары вычисление x производится по формулам (6.61) и (6.62). Предварительное значение часового угла вычисляется в журнале наблюдений с средним прямым восхождением α_N , вычисленным на начало данного года, по формуле

$$\alpha_N = \alpha_{1975} + I_\alpha (N - 1975).$$

Вычисление x (φ , ξ) при наблюдениях на постоянных вертикальных нитях производится по формулам (6.61) и (6.62).

Видимые места звезд, которых нет в АЕ, вычисляются на основании звездного каталога КГЗ-2. При этом координаты звезд переводятся поправками в систему FK-4.

Если вычисления x производят по формулам (6.61) и (6.62), то видимые прямые восхождения не вычисляются.

Если вместо пары наблюдалась одна зенитная звезда, то значение x вычисляется по формуле

$$x = \delta - \varphi_0 \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \frac{1}{2} (\rho_S - \rho_N) + k, \quad (6.63)$$

где

$$k = \frac{\sum f_i^2}{2n\rho^2} \operatorname{tg} \delta_S. \quad (6.64)$$

Значения

$$\sum = \pm \left[(M_S - M_N) \frac{R}{2} + (i_S - i_N) \frac{\tau}{4} \right] + \frac{1}{2} (\rho_S - \rho_N),$$

Вычисление широты из наблюдений пар звезд в произвольных часовых углах

(журнал наблюдений, см. табл. 26)

В ы ч и с л е н и е в и д и м ы х м е с т з в е з д

Действия	Вычисление склонений			Вычисление прямых восхождений			
Дата	19/20—VI—1960 г.			19/20—VI—1960			
№ пары	7			7			
№ звезды 1 и 2	2207 — N		2237 — S	2207—N		2237—S	
$\sphericalangle \alpha_t$	$\sphericalangle 18^{\text{h}}21^{\text{m}}19,9^{\text{s}}$		$18^{\text{h}}35^{\text{m}}35,0^{\text{s}}$				
$\sphericalangle(\lambda_0)$	2 ^h 30,0 ^m						
($\alpha_{\text{ср}} - \lambda_0$)	15 ^h 58 ^m						
Интерп. множитель	+0,665						
$a'_1, \frac{1}{n}(A + A'), a'_2$	+1,864	+0,4015	+3,099	$a_1, \frac{1}{n}(A + A'), a_2$	-0,860	+0,4015	+2,010
$b'_1, (B + B'), b'_2$	+0,9956	+9,682	+0,9880	$b_1, (B + B), b_2$	+0,018	+0,018	-0,008
c'_1, C, c'_2	+1,0822	-0,470	+0,9565	c_1, C, c_2	+0,019	-0,470	+0,013
d'_1, D, d'_2	+0,0880	-20,457	+0,0967	d_1, D, d_2	-0,207	-20,457	-0,084
$\mu_{\delta_1}, \tau, \mu_{\delta_2}$	+0,041	+0,467	+0,283				
δ_N	71° 19' 01,39"		38° 44' 43,27"				
$\Sigma = \delta - \delta_N$	+8,10"		+8,51"	α_N	18 ^h 21 ^m 19,9 ^s	18 ^h 35 ^m 35,0 ^s	
$\delta_{1, 2}$	71° 19' 09,49"		38° 44' 51,78"	$\Sigma\alpha - \alpha_N$	+4,0 ^s	+2,6 ^s	
$\delta = \frac{1}{2}(\delta_S + \delta_N)$	55° 02' 00,64"			$\alpha_{1, 2}$	18 ^h 21 ^m 23,9 ^s	18 ^h 35 ^m 37,6 ^s	
$\frac{1}{2} I_S \operatorname{tg} \delta$	0						

Вычисление широты из наблюдений в произвольных малых часовых углах

Действия	Вычисления	
Номер пары	7	
Номер звезды	2207—N	2237—S
$T_{\text{ср}}$	18h21 ^m 26,6 ^s	18h35 ^m 28,8 ^s
$u + \omega (T_{\text{ср}} - X)$	+10,0	+10,0
α	18 21 24,0	18 35 37,6
i^h	0 00 12,6	0 00 01,2
i^s	0° 03' 09,0"	0° 00' 15,3"
Φ_0	55° 07' 15,00"	55° 07' 15,00"
δ	71 19 09,49	38 44 51,78
$\Phi_0 - \delta$	16 11 54,49	16 22 23,22
$\Phi_0 + \delta$	126 26 24,49	93 52 06,78
$\cos(\Phi_0 - \delta)$	0,960301	0,959447
$1 + \cos t$	2,000000	2,000000
$\cos(\Phi_0 + \delta)$	—	—
$1 - \cos t$	0	0
$\cos z'_{0i}$	0,960301	0,959447
z'_{0i}	16° 11' 54,49"	16° 22' 23,22"
$\frac{1}{2}(z'_{0N} - z'_{0S})_i$		—5' 14,36"
$k = \frac{1}{2}(k_S - k_N)_i$		+0,15
$\frac{1}{2}(z_{0N} - z_{0S})_i$		—5 14,21
$\frac{1}{2}(z_{\text{изм}S} - z_{\text{изм}N})_i$		+5 19,68
$\Phi_i = \Phi_0 + x_i$		+5,47 55° 07' 20,47"

а также $\frac{1}{2}(k_S \pm k_N)$ в формулах (6.56), (6.57) и (6.61), (6.62) целесообразно вычислять непосредственно в журнале наблюдений. При вычислении разности наклонов $i_S - i_N$ необходимо руководствоваться следующими правилами.

Отсчеты по шкале микрометра возрастают с увеличением зенитного расстояния:

нуль делений шкалы уровня вблизи объектива

$$i_S - i_N = (\text{Л} + \text{П})_S - (\text{Л} + \text{П})_N; \quad (6.65)$$

нуль делений шкалы уровня вдали от объектива

$$i_S - i_N = (\text{Л} + \text{П})_N - (\text{Л} + \text{П})_S. \quad (6.66)$$

Отсчеты по шкале микрометра убывают с увеличением зенитного расстояния:

$$i_S - i_N = (\text{Л} + \text{П})_N - (\text{Л} + \text{П})_S; \quad (6.67)$$

Вычисление широты из наблюдений пар звезд
на постоянных вертикальных нитях (журнал наблюдений, см. табл. 27)

Вычисление видимых склонений звезд

Действия	Вычисления			
Дата	24/25—VII—1970 г.		24/25—VII—1970 г.	
№ пары	№ 1		№ 2	
№ звезды 1, 2	1356 — S	1363 — N	1710 (зенитная)	
α_t	17 ^h 31,9 ^m	17 ^h 38,4 ^m	21 ^h 03,5 ^m	
λ_0	3 ^h 06,0 ^m		3 ^h 06,0 ^m	
$(\alpha_0 - \lambda)$	14 ^h 29,2 ^m		17 ^h 57,5 ^m	
Интерп. множитель	+0,603		+0,748	
$a'_1, \frac{1}{n}(A + A'), a'_2$	-2,452	-0,4871	-1,888	+14,386
$b'_1, (B + B'), b'_2$	+0,9925	+9,336	+0,9955	+0,6961
c'_1, C, c'_2	+0,9807	+9,908	+1,0175	+0,7948
d'_1, D, d'_2	-0,0808	-17,386	-0,0678	+0,4967
$\mu_{\delta_1}, \tau, \mu_{\delta_2}$	-0,069	-0,437	-0,000	+0,002
$I_{\delta}, \text{tg } \delta$	0	0	0	0
$\delta_{t1,2}$	+41° 16' 12,09"	+46° 01' 34,42"	+43° 46' 17,52"	
$\delta_{1,2} - \delta_{t1,2}$		+21,61	+21,47	-1,23
$\delta_{1,2}$	+41 16 33,70	+46 01 55,89	+43° 46' 16,29"	
$\frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_2)$	+43° 39' 14,80"		43° 46' 16,29"	

Таблица 31

Вычисление широты

Действия	Вычисления			
№ пары	1		2	
№ звезд	1356 — S	1363 — N	1710 (Зенитная)	
φ_0	43° 37' 55,00"	43° 37' 55,00"	43° 37' 55,00"	
δ_i	41 16 33,70	46 01 55,89	43 46 16,29	
z'_i	2 21 21,30	2 24 00,89	0 08 21,29	
$\frac{1}{2}(z'_{0N} - z'_{0S})_i$	+1' 19,80"		+0° 08' 21,29"	
$k = \frac{1}{2}(k_S \pm k_N)_i$	+0,04		+0,06	
$\frac{1}{2}(z_{0N} - z_{0S})_i$	+1 19,84		+8 21,35	
$\Sigma = \frac{1}{2}(z_{измS} - z_{измN})_i$	-1 24,10		-8 24,94	
$\varphi_i = \varphi_0 + x_i$	-4,26		-3,59	
	43° 37' 50,74"		43° 37' 51,41"	

нуль делений шкалы уровня вдали от объектива

$$i_S - i_N = (J + \Pi)_S - (J + \Pi)_N. \quad (6.68)$$

Обработка журналов наблюдений настолько проста, что не требует пояснений. Она наглядно показана в табл. 26 и 27. Примеры вычисления широты из наблюдений звезд в произвольных часовых углах приведены в табл. 28, 29. Примеры вычисления широты из наблюдений на постоянных вертикальных нитях даны в табл. 30 и 31.

6. Уравнивание широт, наблюденных на пункте; оценка точности определения широты

Специальными исследованиями установлено, что цена оборота окулярного микрометра изменяется как с течением времени, так и с изменением внешних условий наблюдений до $0,2-0,3''$. Поэтому значения широт, вычисленных по парам Талькотта, будут искажены влиянием неправильно принятой цены оборота окулярного микрометра. Для того чтобы ослабить влияние этой погрешности, производят уравнивание вычисленных широт, из которого одновременно с окончательным значением широты получают также вероятнейшее для данного пункта значение цены оборота окулярного микрометра.

Пусть R_0 — приближенная (полученная из исследований) цена оборота окулярного микрометра; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ — значения широт, вычисленные по наблюдениям пар звезд с величиной R_0 ;

$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\sum \varphi_i}{n}$ — среднее арифметическое значение широты из n пар звезд.

Обозначив через ΔR искомую поправку к цене оборота окулярного микрометра, а через $\Delta \varphi$ — поправку к среднему значению широты, получим уравненные значения R и φ из выражений:

$$\left. \begin{aligned} R &= R_0 + \Delta R; \\ \varphi &= \varphi_{\text{ср}} + \Delta \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (6.69)$$

С другой стороны, уравненное значение широты по наблюдениям каждой пары звезд будет

$$\varphi = \varphi_i + (m_{S_i} - m_{N_i}) \frac{\Delta R}{2} + v_i, \quad (6.70)$$

где φ_i — значение широты, вычисленное с R ; v_i — поправка к широте φ_i , определенной из наблюдений талькоттовской пары.

Сравнивая уравненные значения широт в формулах (6.69) и (6.70), получим следующее уравнение поправок

$$\varphi_{\text{ср}} + \Delta\varphi = \varphi_i + (m_{S_i} - m_{N_i}) \frac{\Delta R}{2} + v_i$$

или

$$\Delta\varphi - (m_{S_i} - m_{N_i}) \frac{\Delta R}{2} + (\varphi_{\text{ср}} - \varphi_i) = v_i. \quad (6.71)$$

Для удобства записей введем обозначения:

$$\frac{1}{2} (m_{S_i} - m_{N_i}) = b_i; \quad \varphi_{\text{ср}} - \varphi_i = l_i.$$

Тогда уравнение поправок примет вид

$$\Delta\varphi - b_i \Delta R + l_i = v_i. \quad (6.72)$$

Число таких уравнений равно числу n наблюдаемых пар. Уравнения (6.72) решают по методу наименьших квадратов.

Нормальные уравнения, соответствующие уравнениям поправок (6.72), будут

$$\left. \begin{aligned} n \Delta\varphi - [b] \Delta R + [l] &= 0; \\ - [b] \Delta\varphi + [bb] \Delta R - [bl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.73)$$

В первом нормальном уравнении $[l] = 0$ как сумма отклонений от среднего арифметического.

Решая систему (6.73) с помощью определителей, получим уравненные значения неизвестных из выражений:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta_\varphi}{\Delta}; \quad (6.74)$$

$$\Delta R = \frac{\Delta_R}{\Delta}, \quad (6.75)$$

где

$$\Delta = n [bb] - [b^2], \quad \Delta_\varphi = [b] [bl], \quad \Delta_R = n [bl].$$

Веса уравненных значений неизвестных будут

$$P_\varphi = \frac{\Delta}{[bb]} = n - \frac{[b]^2}{[bb]}; \quad (6.76)$$

$$P_{\Delta R} = \frac{\Delta}{n} = [bb] - \frac{[b]^2}{n}. \quad (6.77)$$

Максимальные значения весов уравненных значений широты и цены оборота окулярного микрометра, очевидно, будут при условии

$$[b] = \frac{1}{2} [(m_S - m_N)] = 0. \quad (6.78)$$

Отсюда вытекает требование: для определения широты с максимальным весом (максимальной точностью) следует всю программу наблюдений на пункте строить так, чтобы алгебраическая сумма разностей отсчетов по микрометру $[(m_S - m_N)]$ была по возможности малой. В соответствии с этим требованием инструкция рекомендует составлять общую программу наблюдений пар Талькотта так, чтобы алгебраическая сумма разностей зенитных расстояний южных и северных звезд не превышала величины порядка $30'$.

Оценку точности производят по известным формулам метода наименьших квадратов.

Средняя квадратическая погрешность единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-2}}; \quad (6.79)$$

средняя квадратическая погрешность определения широты пункта

$$M_\varphi = \frac{\mu}{\sqrt{P_\varphi}}; \quad (6.80)$$

средняя квадратическая погрешность определения цены оборота микрометра

$$M_R = \frac{\mu}{\sqrt{P_R}}. \quad (6.81)$$

В формуле (6.79) $[v^2]$ определяется из известного выражения $[v^2] = [l^2] + [l] \Delta\varphi - [bl] \Delta R$.

Имея в виду, что $[l] = 0$, а значение ΔR , на основании (6.75), равно

$$\Delta R = \frac{n [bl]}{n [bb] - [b]^2},$$

где в знаменателе $[b]^2$ пренебрегаемо мало по сравнению с $n [bb]$, получим

$$[v^2] = [l^2] - \frac{[bl]^2}{[bb]}. \quad (6.82)$$

По формуле (6.82) можно находить $[v^2]$ без вычислений самих значений v_i путем подстановки уравненных значений неизвестных в уравнения поправок.

В табл. 32 приведен пример уравнения широт на пункте за неправильно принятую цену оборота окулярного микрометра.

Уравнивание широты, определенной по способу Талькотта

Пункт 1 класса *Ивановка*

Дата	Номер звезды		φ_i	l_i	$b_i = \frac{1}{2} \times$ $\times (m_S -$ $- m_N)_i^{06}$	Коэффициенты и свободные члены нормальных уравнений
	<i>N</i>	<i>S</i>				
1	2	3	4	5	6	7
8/9 августа	1730	1748	57° 18' 08,89"	-1,06"	+2,7	$n = 15$ $[b] =$ $= +12,70$ $[bb] =$ $= +66,15$ $[bl] =$ $= -4,03$ $[ll] =$ $= +4,54$
8/9 »	1812	1801	8,11	-0,37	0,0	
8/9 »	1824	1830	7,33	+0,41	+1,4	
9/10 »	1544	1560	7,45	+0,29	+0,5	
9/10 »	1606	1616	8,12	-0,38	+2,8	
9/10 »	1606	1618	7,15	+0,59	+3,6	
9/10 »	1615	1638	8,16	-0,42	-2,8	
9/10 »	1840	1852	7,27	+0,47	-0,4	
10/11 »	1812	1801	7,95	-0,21	-0,0	
10/11 »	1824	1830	7,92	-0,18	+1,4	
10/11 »	1840	1852	07,75	-0,01	-0,4	
10/11 »	1866	1880	7,57	+0,17	+3,6	
13/24 »	1381	1372	8,62	-0,88	+2,8	
13/14 »	1427	1438	6,88	+0,86	-0,3	
13/14 »	1449	1442	7,02	+0,72	-2,2	

$$\varphi_{cp} = 57^\circ 18' 07,74'' \quad 0 \quad +12,7$$

$$\Delta\varphi = -0,06$$

$$\varphi = 57^\circ 18' 07,68''$$

Нормальные уравнения

$$15\Delta\varphi - 12,70 \Delta R + 0 = 0$$

$$-12,70 \Delta\varphi + 66,15 \Delta R + 4,03 = 0$$

$$\Delta = n [bb] - [b]^2 = 15 \cdot 66,15 - (12,70)^2 = 992,25 - 161,29 = +830,96$$

$$\Delta_\varphi = [b] [bl] = 12,7 \cdot (-4,03) = -51,18$$

$$\Delta_R = n [bl] = 15 \cdot (-4,03) = -60,45$$

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta_\varphi}{\Delta} = -\frac{51,18}{830,96} = -0,06''; \quad \Delta R = \frac{\Delta_R}{\Delta} = -\frac{60,45}{830,96} = -0,07'';$$

$$P_\varphi = \frac{\Delta}{[bb]} = \frac{830,96}{66,15} = 12,6; \quad P_R = \frac{\Delta}{n} = \frac{830,96}{15} = 55,4;$$

$$[v^2] = [ll] - \frac{[bl]^2}{[bb]} = +4,54 - \frac{16,24}{66,15} = 4,54 - 0,24 = 4,30;$$

$$\mu = \sqrt{\frac{4,30}{13}} = 0,57''; \quad M_\varphi = \frac{0,57''}{\sqrt{12,6}} = 0,16'';$$

$$M_R = \frac{0,57''}{\sqrt{55,4}} = 0,08''.$$

**§ 45. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ
МАЛЫМ РАЗНОСТЯМ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЙ
ПАР ЯРКИХ ЗВЕЗД ВБЛИЗИ МЕРИДИАНА**

Отмеченные в предыдущем параграфе недостатки способа Талькотта можно устранить, если пары звезд наблюдать не в самом меридиане, а в удалениях от него до 30—40°. Для получения широты с максимальным весом выбор звезд в каждой паре в этом случае необходимо подчинить условиям симметричного расположения по азимутам относительно плоскости первого вертикала, т. е.

$$A_N = 180^\circ - A_S \text{ или } A_N = 540^\circ - A_S.$$

Указанным условиям отвечают, как известно, пары звезд на равных высотах, служащие для определения широты способом Певцова¹. В высоких широтах наблюдения прохождений звезд через горизонтальные нити трубы по методу, применяемому в способе Певцова, практически невозможно, так как в этих широтах угол между альмукантаратом и суточной параллелью для звезд вблизи меридиана становится чрезвычайно малым. В этих условиях оказывается весьма эффективным наблюдение пар Певцова с помощью подвижной нити окулярного микрометра по методу, применяемому в способе Талькотта.

Действительно, при удалениях от меридиана до 30—40° можно легко подобрать пары звезд на равной высоте из ярких составляющих. Кроме того, при наблюдениях пар звезд на равных высотах измеряемая с помощью окулярного микрометра разность зенитных расстояний не превышает, как правило, нескольких десятых долей оборота винта. При таких малых разностях из результатов наблюдений практически исключается как влияние погрешностей хода винта микрометра, так и влияние возможных изменений цены оборота винта с изменением внешних условий наблюдений.

Многочисленные наблюдения каждой звезды с помощью подвижной нити окулярного микрометра целесообразно производить вблизи бесколлимационной плоскости трубы, благодаря чему исключается влияние коллимационной ошибки, а также наклона подвижной нити.

При соблюдении указанных выше условий симметричности, на основании двух уравнений вида (5.28), величина x найдется из следующего выражения:

$$x = \frac{(z_{0N} - z_{0S})}{\cos A_S - \cos A_N} \pm \frac{1}{\cos A_S - \cos A_N} [(M_S - M_N) R + (i_S - i_N) \frac{\tau}{2} + (\rho_S - \rho_N)], \quad (6.83)$$

¹ Способ Певцова подробно изложен в главе 7.

Пример

определения широты по измеренным малым разностям ($z_S - z_N$)
зенитных расстояний пар звезд вблизи меридиана

Ж у р н а л н а б л ю д е н и й

Теодолит АУ 2"/10" № 1357, $\tau = 1,44''$, $R = 114,501''$

Дата: 12/13.9.1970 г.

Пара 254 (из эфемерид пар Певцова)

$$z = 37^\circ 21'$$

<p>483 — N (4.0) $s_N = 23^{\text{h}}36^{\text{m}}$ $A_N = 152^\circ 23'$ 41,5—07,4 41,0—07,0</p> <hr style="width: 100%;"/> <p>41,25—07,20 (Л + П)_N = 48,45</p> <p>23^h37^m13^s 8,699⁰⁶ 33 9,541 53 10,424 38 12 11,245 38 30 12,063</p> <hr style="width: 100%;"/> <p>$T_N = 23^{\text{h}}37^{\text{m}}52,20^{\text{s}}$ $M_N = 10,3944^{06}$</p>	<p>557 — S (3.6) $s_S = 23^{\text{h}}47^{\text{m}}$ $A_S = 27^\circ 37'$ 39,0—05,0 39,9—05,3</p> <hr style="width: 100%;"/> <p>39,45—06,15 (Л + П)_S = 44,60</p> <p>23^h49^m04^s 8,410⁰⁶ 26 9,371 46 10,255 50 08 11,218 28 12,136</p> <hr style="width: 100%;"/> <p>$T_S = 23^{\text{h}}49^{\text{m}}46,40^{\text{s}}$ $M_S = 10,2780^{06}$</p>
$(T_n - T_1)_S = 84^{\text{s}}$	

$$(i_S - i_N) \frac{\tau}{2} [(Л + П)_N - (Л + П)_S] \frac{\tau}{2} = 3,85 \times 0,72 = +2,78''$$

$$(M_S - M_N) R = -0,1164^{06} \times 114,501'' = -13,33''$$

$$\rho_S - \rho_N = 0,0175'' \times \sec^2 z \times (M_S - M_N) \frac{R}{60} = 0,00''$$

$$\Delta x_v = 0,227 \frac{n+1}{n-1} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)_s^2 \sin 2\varphi_0 = -0,227 \times 1,5 \times 0,7056 = -0,24''$$

В ы ч и с л е н и е с о с т а в л я ю щ е й x_i

Обозначения	12/13 сентября 1970 г. Пара 254	
	№ звезды	
	483—N	557—S
T_H	23 ^h 37 ^m 52,20 ^s	23 ^h 49 ^m 46,40 ^s
u_0	—51,77	—51,77
$\omega (T_H - X)$	—0,42	—0,47
s	23 37 00,01	23 48 54,16
α	19 48 18,26	22 40 01,59
t^{h}	3 48 41,75	1 08 52,57
t°	57° 10' 26,25''	17° 13' 08,25''
φ_0	44 58 35,00	44 58 35,00
δ	70 11 46,66	10 40 49,29
$\varphi_0 - \delta$	—25 13 11,66	34 17 45,71
$\varphi_0 + \delta$	115 10 21,06	55 39 24,29
$1 + \cos t$	1,5420901	1,9551801
$\cos (\varphi_0 - \delta)$	0,9046791	0,8261373

Обозначения	12/13 сентября 1970 г.	
	Пара 254	
	№ звезды	
	483 — N	557 — S
$\cos(\varphi_0 + \delta)$	-0,4253479	0,5661495
$1 - \cos t$	0,4579099	0,0448199
$\cos z_{0N,S}$	0,7949338	0,7949810
$z_{0N,S}$	37° 21' 03,60"	37° 20' 47,56"
$(z_{0N} - z_{0S})$		+16,04"
$(M_S - M_N) R$		-13,33
$(i_S - i_N) \frac{\tau}{2}$		+2,78
$(\rho_S - \rho_N)$		0,00
Δx_p		-0,24
$\sum \dots \dots$		+5,25
$\cos A_S - \cos A_N$		1,772
$P_{x_i} = 2 \cos^2 A_S$		+2,96"
		1,58

с весом

$$P_{x_i} = [\cos^2 A]_i = 2 \cos^2 A_{S_i},$$

где

$$z_{0N,S} = z'_{0N,S} + \Delta z_{w_{N,S}};$$

$$z'_{0N,S} = \arccos \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_{N,S}) (1 + \cos t_{0N,S}) - \cos(\varphi_0 + \delta_{N,S}) (1 - \cos t_{0N,S})];$$

$$\Delta z = w_{N,S} = \frac{15^2}{2n\rho} \frac{d^2z}{dt^2} \sum \Delta T_{N,S}^2; \quad \frac{d^2z}{dt^2} = m + n \operatorname{ctg} z.$$

Уравненное значение широты пункта из наблюдений n пар звезд получают по формулам

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{ср}} &= \frac{\sum P_{x_i} \cdot x_i}{\sum P_{x_i}} \quad \text{с весом } P_{x_{\text{ср}}} = \sum P_{x_i}; \\ \varphi &= \varphi_0 + x_{\text{ср}} \quad \text{с весом } P_\varphi = P_{x_{\text{ср}}}. \end{aligned} \right\} \quad (6.84)$$

Оценку точности производят по известной формуле

$$M_\varphi = M_{x_{\text{ср}}} = \sqrt{\frac{P_{x_i} v_{x_i}^2}{(n-1) [P_{x_i}]}}; \quad v_{x_i} = x_{\text{ср}} - x_i. \quad (6.85)$$

Рассмотрим пример определения широты по измененным малым разностям зенитных расстояний пар ярких звезд вблизи меридиана, схемы вычислений приведены в табл. 33—34.

Вычисление $x_{\text{ср}}$ и широты пункта

Номер пары	x_i	P_{x_i}	Номер пары	x_i	P_{x_i}
188	+3,33"	1,16	229	+1,28	1,34
201	+3,35	1,37	243	+1,39	1,38
207	+0,44	1,36	250	+1,25	1,50
212	+0,92	1,73	254	+2,96	1,51
221	+2,09	1,64	2	+2,15	1,62
223	+1,82	1,38	8	+0,53	1,56

$$x_{\text{ср}} = \frac{[x_i P_{x_i}]}{[P_{x_i}]} = +1,79'', \quad P_{x_{\text{ср}}} = [P_{x_i}] = 17,62,$$

$$\varphi = \varphi_0 + x_{\text{ср}} = 44^\circ 58' 35,00'' + 1,79'' = 44^\circ 58' 36,79'',$$

$$M_\varphi = M_{x_{\text{ср}}} = \sqrt{\frac{[P_{x_i} v_{x_i}^2]}{(n-1) P_{x_{\text{ср}}}} = 0,28''.$$

**§ 46. ПОНЯТИЕ О СПОСОБАХ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОТЫ (ВРЕМЕНИ)
ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗЕНИТНЫМ РАССТОЯНИЯМ СВЕТИЛ**

Для определения составляющей y с максимальным весом наблюдения светил на основании (5.41) и (5.53) необходимо производить в первом вертикале равным числом по обе стороны от зенита.

В этом случае $P_{y_{\text{max}}} = [\sin^2 A] = n$,

где n — число наблюдаемых звезд. Определение y (долготы, времени) можно производить из наблюдений серии или пар звезд. Рассмотрим кратко сущность этих способов.

**1. Определение долготы (времени)
по измеренным зенитным расстояниям n звезд
в первом вертикале**

Сущность способа состоит в измерении зенитных расстояний n звезд в первом вертикале, расположенных симметрично относительно зенита. Зенитные расстояния звезд выбираются в пределах $10^\circ < z < 60^\circ$.

Наблюдения производят короткими сериями по 8—10 звезд, замкнутыми приемами радиосигналов точного времени. В зависимости от требуемой точности определений наблюдение проходжений звезд производят с помощью контактного микрометра или методами «глаз—клавиша» и «глаз—ухо». Для каждой наблюдений

ной звезды составляется уравнение поправок вида (5.28), в котором коэффициент $b_i = 0$,

$$a\xi + c_i y + l_i = v_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6.86)$$

Так как $[ac] = 0$, то в результате решения n уравнений поправок (6.86) по методу наименьших квадратов получим

$$y = - \frac{[cl]}{[cc]} \quad \text{с весом } P_y = [\sin^2 A] = n. \quad (6.87)$$

Долгота пункта вычисляется для каждой серии по формуле

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi \quad \text{с весом } P_{\lambda'} = P_y \cos^2 \varphi.$$

В случае необходимости может быть вычислена поправка хронометра

$$u' = u_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi \quad \text{в момент } X \quad \text{с весом } P_{u'} = P_y \cos^2 \varphi,$$

а также составляющая астрономо-геодезического уклонения отвесной линии в первом вертикале

$$\eta = y + 15 (\lambda_0 - L) \cos \varphi \quad \text{с весом } P_y.$$

Оценка точности производится по известным формулам

$$\mu = \sqrt{\frac{[vv]}{n-2}},$$

$$m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}}, \quad m_{\lambda'_u} = \frac{1}{15} m_y \sec \varphi.$$

2. Определение долготы (времени) по измеренным зенитным расстояниям пар звезд в первом вертикале

С целью ослабления систематического влияния погрешностей рефракции, гнуптия трубы инструмента, погрешностей диаметров вертикального лимба и других систематических погрешностей, действующих в функции зенитных расстояний светил, целесообразно наблюдать пары звезд в первом вертикале, с разностью зенитных расстояний, не превышающей $5-6^\circ$. Подбор таких пар по «Эфемеридам для наблюдений звезд в первом вертикале» не составляет проблемы. Значение y для каждой пары звезд вычисля-

ется по формуле (6.87). Подставив значения коэффициентов и свободных членов для восточной и западной звезд пары, получим

$$y_i = \frac{1}{2} (z_{0E} - z_{0W})_i + \frac{1}{2} \left[(L_W - L_E) + (i_W - i_E)^{\theta/2} \frac{\tau}{2} + \right. \\ \left. + (\rho_W - \rho_E) \right]_i \quad \text{с весом } P_{y_i} = 2, \quad (6.88)$$

где

$$z_{0E, W} = \arccos \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_{E, W}) (1 + \cos t_{0E, W}) - \\ - \cos(\varphi_0 + \delta_{E, W}) (1 - \cos t_{0E, W})];$$

$$t_{0E, W} = T_{HE, W} + \Delta T_{aE, W} + u_0 + \omega (T_{HE, W} - X) - \alpha_{E, W},$$

где $\Delta T_{aE, W} = -0,021^s \cos z$ — поправка за влияние суточной абберрации; $(L_W - L_E)$ — разность средних отсчетов по вертикальному лимбу при наблюдениях звезд пары; $(i_W - i_E)^{\theta/2}$ — разность наклонностей оси уровня при вертикальном круге, выраженная в полуделениях; $(\rho_W - \rho_E)$ — разность влияния рефракции для звезд пары.

Уравненное значение y вычисляется как среднее арифметическое, т. е.

$$y_{\text{ср}} = \frac{\sum_i y_i}{n} \quad \text{с весом } P_{y_{\text{ср}}} = 2n, \quad (6.89)$$

где n — число пар, принятых в обработку.

Долгота пункта будет

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi \quad \text{с весом } P_{\lambda'} = P_{y_{\text{ср}}} \cos^2 \varphi. \quad (6.90)$$

Оценка точности производится по известным формулам теории погрешностей

$$m_{y_{\text{ср}}} = \sqrt{\frac{[v_y v_y]}{n(n-1)}}, \quad \text{где } v_{y_i} = y_{\text{ср}} - y_i; \quad m_{\lambda'} = \frac{1}{15} m_{y_{\text{ср}}} \sec \varphi.$$

**СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ
ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ
(СПОСОБЫ РАВНЫХ ВЫСОТ)**

Способы равных высот являются частными случаями способов наблюдений светил на разных высотах. В данной группе способов на выбор звезд накладывається общее ограничивающее условие: звезды в сериях или парах наблюдаются на равных высотах. В связи с этим возникают некоторые особенности в методике наблюдения зенитных расстояний светил. При наблюдениях групп звезд в одном альмукантарате труба ставится на данное зенитное расстояние по отсчету вертикального лимба L_0 (с точностью 1—2'), который, очевидно, будет одним и тем же для всех звезд, наблюдаемых на данной высоте. В этом положении труба теодолита надежно закрепляется зажимным винтом. С трубой теодолита жестко скрепляется талькоттовский уровень, по отсчетам которого можно судить об уклонениях трубы по высоте при изменении положения верхней части теодолита по азимуту. При этом условно полагают, что в течение ограниченного промежутка времени внешние условия (температура, давление, влажность), а также взаимное положение частей прибора — угол между визирной осью трубы и осью талькоттовского уровня, место зенита, гнутие трубы — остаются практически неизменными для всех звезд, наблюдаемых на данной высоте.

С учетом сказанного, для любой звезды группы, наблюдаемой на данной высоте, значение измеренного зенитного расстояния можно представить в виде

$$z_{\text{изм}_i} = L_0 + \Delta L - (M^\circ z + \Delta Mz) + i \frac{\tau}{2} + \rho + g \sin z, \quad (7.1)$$

где L_0 — приближенный (с точностью до 1—2') отсчет по вертикальному лимбу при установке трубы теодолита на данное зенитное расстояние; ΔL — истинная поправка отсчета по вертикальному лимбу.

Обозначим через установочное (эфемеридное) зенитное расстояние величину

$$z_{\text{эф}} = L_0 - M^\circ z. \quad (7.2)$$

Совокупность постоянных для данного зенитного расстояния поправочных величин в формуле (7.1) обозначим через ζ'

$$\zeta' = \Delta z_{\text{const}} = \Delta L - \Delta Mz + \rho + g \sin z_{\text{эф}}. \quad (7.3)$$

С учетом (7.2) и (7.3) выражение (7.1) запишется в виде

$$z_{\text{изм}} = z_{\text{эф}} + \xi' + i_i \frac{\tau}{2}. \quad (7.4)$$

Общее уравнение поправок зенитальных способов (5.28) с учетом (7.4) примет вид

$$a\xi' + b_i x + c_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = 1, \quad (7.5)$$

где

$$a = -1; \quad b_i = \pm \cos A_i, \quad c_i = \pm \sin A_i,$$

$$l_i = z_{0_i} - z_{\text{эф}}; \quad (7.6)$$

$$z_{0_i} = z'_{0_i} + \Delta l_i + \Delta l_{w_i} + \Delta l_{v_i}; \quad (7.7)$$

$$z'_{0_i} = \arccos \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_i)(1 + \cos t_{0_i}) - \cos(\varphi_0 - \delta_i)(1 - \cos t_{0_i})]; \quad (7.8)$$

$$t_{0_i} = T_{H_i} + \Delta T_{a_i} + u_0 + \omega(T_{H_i} - X) - \alpha_i;$$

$$\Delta l_i = -i^{\partial/2} \frac{\tau}{2}, \quad (7.9)$$

$$\Delta l_{w_i} = 0,454 \frac{k+1}{k-1} \frac{d^2 z}{di^2} \left(\frac{T_k - T_1}{100} \right)^2, \quad (7.10)$$

$$\Delta l_{v_i} = \pm (\pm \text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2}, \quad (7.10')$$

$$T_{H_i} = \frac{\sum T_{k_i}}{k}, \quad \Delta T_a = -0,021^s \cos z_{\text{эф}}.$$

Уравнение поправок (7.5) является общим для всех способов определения широты и времени, основанных на принципе равных высот. Оно, как видно, принципиально ничем не отличается от общего уравнения зенитальных способов (5.28). Из уравнений (7.5) следует, что при наблюдениях светил на равных высотах отпадает необходимость производства точных отсчетов по вертикальному лимбу или окулярному микрометру. Это обстоятельство позволяет применить для точных определений широты и времени (долготы), наряду с астрономическим теодолитом, специальные приборы, в которых вертикальный круг либо совсем отсутствует (призменная астролыбия), либо имеется грубый круг-искатель, необходимый только для ориентировочной (0,5—1') установки трубы на данное зенитное расстояние (зенит-телескоп).

Поправка ξ' к установочному (эфемеридному) зенитному расстоянию $z_{\text{эф}}$ с учетом не только полной поправки отсчета по лимбу, но и совокупности всех других поправок, постоянных для данного зенитного расстояния, найдется из совместной обработки наблюдений звезд на данной высоте.

Таким образом, при производстве наблюдений звезд на равных высотах из результатов определений x и y (φ и λ) исключается систематическое влияние погрешностей рефракции, гнущия трубы прибора, а также погрешностей, связанных с отсчетами по лимбу: места зенита, систематических и случайных погрешностей диаметров лимба, отсчетных приспособлений и т. д.

На этом основании можно утверждать, что способы астрономических определений, основанные на принципе равных высот, при прочих равных условиях будут давать результаты более точные, чем способы, основанные на принципе измерения зенитных расстояний светил на разных высотах. Наблюдения звезд на равных высотах позволяют производить как совместные, так и отдельные определения широты и долготы. Рассмотрим кратко целесообразные способы равных высот.

§ 47. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ n ЗВЕЗД В ОДНОМ АЛЬМУКАНТАРАТЕ

1. Общие положения

Способ совместного определения широты и долготы из наблюдений n звезд в одном альмукантарате является наиболее общим способом, из которого любые другие способы равных высот вытекают как частные случаи.

Принципиальное решение задачи совместного определения широты и времени из наблюдений трех звезд на равной высоте было дано Гауссом в 1808 г.

Русский астроном Кнорре в 1832 г. расширил задачу Гаусса, предложив решение по дифференциальным формулам наблюдений серии из n звезд ($n \geq 3$) в одном альмукантарате.

В 1942—1945 гг. профессор А. В. Мазаев разработал методику наблюдений способом равных высот с помощью астрономического теодолита. Им же составлены эфемериды звезд для наблюдений в альмукантаратах $z = 30^\circ$ и $z = 45^\circ$ для широт от $+15$ до $+70^\circ$. Поэтому в применении к астрономическому теодолиту данный способ принято называть способом Мазаева. В настоящее время эфемериды звезд для наблюдений в альмукантарате $z = 45^\circ$ составлены для широт от $+70^\circ$ до -70° .

На основании общей теории зенитальных способов, изложенной в главе 5 для совместного определения x и y с равной точностью ($P_x = P_y$) наблюдения n звезд в одном альмукантарате необходимо производить при условии их равномерного распределения по азимутам.

Процесс наблюдений звезд в одном альмукантарате состоит из: фиксации моментов T_i по хронометру прохождения светила через горизонтальные нити неподвижной по высоте трубы теодолита (фиксации моментов контактирования при наблюдениях с контактными микрометром);

отсчетов талькоттовского уровня, скрепленного с трубой, для учета изменения положения трубы по высоте при наблюдениях звезд в различных азимутах.

При наблюдениях с контактными микрометром с целью исключения влияния наклона подвижной нити и коллимационной ошибки теодолит должен быть снабжен электромоторным приводом для вращения его алидадной части по азимуту или специальным позиционным устройством.

Наблюдения каждой серии из n звезд замыкаются приемами радиосигналов точного времени. Для каждой наблюдаемой звезды данной серии составляется уравнение поправок вида (7.5). Решение системы из n уравнений поправок по методу наименьших квадратов позволяет получить уравненные значения неизвестных и оценить точность их вывода. Решение нормальных уравнений и оценка точности производятся по стандартным формулам (5.29)—(5.37). В соответствии с требованиями инструкции определение широты и долготы пунктов Лапласа производится из наблюдений не менее шести серий по 12—16 звезд в каждой серии.

2. Особенности наблюдений звезд с контактными микрометром

Как известно, при наблюдениях моментов прохождений звезд через горизонтальные нити трубы теодолита методом «глаз—ухо», в целях исключения влияния коллимации¹ и возможного наклона горизонтальных нитей, изображение звезды во время ее наблюдения удерживают вблизи средней вертикальной нити вращением наводящего винта алидады горизонтального круга.

При наблюдениях с контактными микрометром во время визирования на звезду подвижной нитью микрометра обе руки наблюдателя заняты вращением рукояток контактного микрометра. Чтобы исключить в этом случае влияние коллимации и наклона подвижной нити микрометра, возможно применение двух различных методов наблюдений.

Первый метод состоит в том, чтобы с помощью специального приспособления придать верхней части теодолита вращение со скоростью, равной видимой азимутальной скорости движения звезды. В этом случае азимутальная составляющая общей скорости видимого движения светила компенсируется, и изобра-

¹ Здесь под термином «коллимация» подразумевается величина удаления звезды в поле зрения трубы от вертикала прибора в момент ее наблюдения.

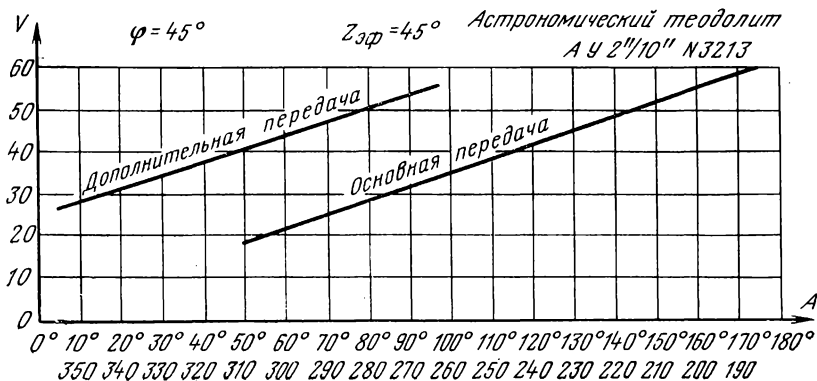


РИС. 77

жение светила в поле зрения трубы подвижного по азимуту прибора будет смещаться только по зенитному расстоянию параллельно вертикальным нитям. Если с помощью корректировочного винта установить теодолит так, чтобы изображение звезды было близко к средней вертикальной нити, то и в дальнейшем во время наблюдения звезды она будет смещаться параллельно этой нити и вблизи от нее.

Таким образом, для компенсации влияния коллимации и наклона подвижной нити микрометра в этом методе используют те же приемы, что и при наблюдениях методом «глаз—ухо». В качестве приспособления, вращающего верхнюю часть прибора по азимуту, применяется моторчик постоянного тока, связанный с наводящим винтом алидады горизонтального круга системой передачи (редуктором). В полое тело наводящего винта ввинчивается корректировочный винт, вращая который вручную, можно устанавливать изображение светила вблизи средней вертикальной нити ¹.

Изменение скорости вращения прибора по азимуту при наблюдениях различных звезд достигается изменением величины подаваемого на моторчик напряжения с помощью реостата сопротивления, вмонтированного в пульт управления.

При работе на малой скорости вращения прибора в редукторе целесообразно иметь кроме основной дополнительную передачу с увеличенным коэффициентом редукции.

Подбор необходимой скорости вращения прибора осуществляется опытным путем из наблюдений 8—10 звезд в данном альму-кantarате в различных азимутах. При этом для каждой звезды записываются ее азимут и показание вольтметра, соответствующее

¹ Подробное описание механизма для вращения прибора по азимуту дано в первой главе.

напряжению, подаваемому на моторчик. По результатам этих наблюдений строится график зависимости показаний вольтметра от азимутов звезд (рис. 77).

Пользование этим графиком облегчает подбор необходимой скорости вращения верхней части теодолита по азимуту во время наблюдений звезд серии.

Во втором методе наблюдения звезд с контактным микрометром производят при неподвижном по азимуту теодолите. В этом случае изображение звезды во время наблюдения будет перемещаться по подвижной нити, и фиксирование контактами микрометра моментов ее прохождения по высоте будет происходить на разных точках подвижной нити, при разных значениях текущей коллимации c . Отсюда возникает необходимость принимать особые меры для исключения влияний погрешностей, связанных с фиксированием звезды подвижной нитью контактного микрометра на различных расстояниях от вертикальной нити, а также наклона подвижной нити.

3. Влияние коллимации на зенитное расстояние светила

На основании формулы (4.16), полагая $b = 0$, имеем

$$\Delta z_{c_i} = z'_i - z_i = \frac{c_i^2}{2\rho^n} \operatorname{ctg} z, \quad (7.11)$$

где z_i — зенитное расстояние, соответствующее i -му контакту микрометра при значении текущей коллимации $c_i = 0$; z'_i — то же, при значении текущей коллимации c_i .

При вычислении зенитного расстояния со средним моментом наблюдения на k контактах будем иметь

$$z_{\text{ср}} = z'_0 - \frac{1}{k} [\Delta z_{c_i}] = z'_0 - \frac{1}{2k\rho^n} \operatorname{ctg} z [c_i^2], \quad (7.12)$$

где z'_0 — зенитное расстояние, вычисленное со средним моментом наблюдения T_H , исправленное поправкой за ускорение движения звезды.

При наблюдениях серии из n звезд в одном альмукантарате и в различных азимутах значения $[c_i^2]$ будут различны для каждой звезды. Поэтому исключить влияние коллимации из наблюдений, выполненных при неподвижном по азимуту приборе, нельзя. Это влияние можно лишь несколько ослабить, приняв меры к тому, чтобы значение $[c_i^2]$ было наименьшим при данных условиях наблюдений. Очевидно, что для выполнения этого требования наблюдение каждой звезды необходимо выполнять симметрично относительно вертикала прибора (средней вертикальной нити, имеющей коллимацию, близкую к нулю).

В этом случае значение текущей коллимации для i -го контакта микрометра можно представить в виде

$$c''_i = 15 \Delta T_i^s \cos \delta \cos q, \quad (7.13)$$

где $\Delta T_i = T_i - T_H$.

С учетом (7.13) формула (7.12) примет вид

$$z_{cp} = z'_0 - \frac{15^2}{2k\rho''} \operatorname{ctg} z \cos^2 \delta \cos^2 q \sum \Delta T_i^2. \quad (7.14)$$

При наблюдениях в альмукантарате $z = 45^\circ$ $\operatorname{ctg} z = 1$.

По формуле пяти элементов имеем

$$\cos \delta \cos q = \sin z \sin \varphi + \cos z \cos \varphi \cos A \quad (7.15)$$

или для $z = 45^\circ$

$$m = \cos \delta \cos q = 0,707 (\sin \varphi + \cos \varphi \cos A). \quad (7.16)$$

На основании формулы (7.16) можно легко составить таблицу значений $m^2 = 0,5 (\sin \varphi + \cos \varphi \cos A)^2$.

Обозначив

$$\frac{15^2}{2k\rho} = P,$$

получим

$$z_{cp} = z_0 - Pm^2 \sum \Delta T_i^2. \quad (7.17)$$

По формуле (7.17) можно вычислить зенитное расстояние звезды, исправленное поправкой за влияние коллимации. $\sum \Delta T_i^2$ в этом случае подсчитывается в журнале наблюдений.

Формулу (7.14) можно еще более упростить, если выразить величину ΔT_i через соответствующие приращения зенитного расстояния. Ввиду малости поправки за коллимацию можно положить

$$15 \Delta T_i^s = \frac{\Delta z'_i}{\cos \varphi \sin A}. \quad (7.18)$$

Подставив (7.18) в формулу (7.14), получим

$$z_{cp} = z'_0 - \frac{1}{2k\rho} \frac{\operatorname{ctg} z \cos^2 \delta \cos^2 q \sum \Delta z_i^2}{\cos^2 \varphi \sin^2 A}.$$

Так как $\cos \varphi \sin A = \cos \delta \sin q$ и при $z = 45^\circ$ $\operatorname{ctg} z = 1$,

$$z_{cp} = z'_0 - \frac{\operatorname{ctg}^2 q}{2k\rho''} \sum \Delta z_i^2, \quad (7.19)$$

где

$$\Delta z_i'' \approx z_i - z_{cp} = (m_i - m_{cp}) R''.$$

Очевидно $\sum \Delta z_i^2$ в пределах одного оборота микрометра для данного прибора есть величина постоянная.

Для микрометра с ценой оборота $R = 100''$ и числом контактов $k = 9$, равномерно располагающихся по окружности, $\sum \Delta z_i^2 \approx 9600$.

Таким образом, поправка за коллимацию в вычисленное зенитное расстояние будет численно равна

$$\Delta z_c = \frac{9600}{2 \cdot 9 \cdot \rho''} \operatorname{ctg}^2 q = \frac{1''}{387} \operatorname{ctg}^2 q. \quad (7.20)$$

Из формулы (7.20) следует, что при $z = 45^\circ$ поправка за коллимацию не превзойдет по абсолютному значению $0,1''$, если параллактический угол звезды более 10° , а наблюдения располагаются симметрично относительно вертикала прибора и в обработку принят один оборот контактного микрометра. Такой величиной поправки можно пренебречь по малости.

При необходимости поправку за коллимацию можно учитывать по формуле (7.17) или (7.19).

4. Влияние наклона подвижной нити

Если подвижная нить микрометра наклонена к горизонту на угол β , то звезды серии, наблюдавшиеся на k контактах микрометра, имеют в средний момент наблюдения зенитные расстояния

$$z_i = z'_{cp} + \frac{1}{k} [\Delta z_{\beta_i}], \quad (7.21)$$

где z'_{cp} — общее для звезд серии зенитное расстояние, соответствующее среднему из k контактов, на котором наблюдались бы звезды на подвижной нити микрометра в точке с коллимацией, равной $c = 0$;

$$\Delta z_{\beta_i} = c_i \operatorname{tg} \beta = c_i \frac{\beta''}{\rho''}, \quad (7.22)$$

где Δz_{β_i} — влияние наклона подвижной нити для контакта с номером i и значением коллимации c_i .

Для удобства изложения так же, как и при рассмотрении влияния коллимации, примем поправку за изменение наклона трубы теодолита при переходе от одной звезды серии к другой равной нулю.

Подставив значение Δz_{β_i} из формулы (7.22) в формулу (7.21), получим

$$z_i = z'_{cp} + \frac{\beta''}{k\rho''} [c_i]. \quad (7.23)$$

Из формулы (7.23) следует, что для исключения влияния наклона подвижной нити микрометра на каждой звезде при неподвижном по азимуту теодолите необходимо, чтобы $[c_i] = 0$, т. е.

чтобы контакты микрометра при наблюдениях располагались симметрично относительно бесколлимационной плоскости прибора:

Полагая $\beta = 10'$, $k = 9$, найдем то значение $[c_i]$, при котором влиянием наклона подвижной нити микрометра можно было бы пренебречь по малости. Примем для этого случая

$$\frac{\beta}{k\rho''} [c_i] \leq 0,05'',$$

отсюда

$$[c_i] \leq \frac{0,05'' k\rho''}{\beta},$$

т. е.

$$[c_i] < 155''.$$

Таким образом, практически для исключения влияния наклона подвижной нити при наблюдениях n звезд серии достаточно выдержать условие симметричности расположения контактов относительно одной и той же точки, располагающейся на средней вертикальной нити, причем коллимация последней не должна превышать $1,5-2'$. Впрочем, для исключения влияния наклона подвижной нити важно, чтобы при наблюдении всех n звезд серии $[c_i] = \text{const}$, т. е. чтобы следы изображений всех звезд пересекались в одной и той же точке поля зрения трубы и контакты располагались симметрично относительно нее. Для выполнения этого условия контактный микрометр должен иметь специальное позиционное устройство.

Одним из удачных решений такого устройства является позиционное устройство в оптическом теодолите ДКМ-ЗА фирмы Керн (Швейцария). Чертеж этого позиционного устройства вместе с сеткой нитей представлен на рис. 78. Позиционное устройство в виде градуированного круга нанесено в фокальной плоскости трубы на одном стекле с сеткой постоянных нитей.

Как известно, суточная параллель светила пересекает альмукантарат под позиционным углом, численно равным параллактическому углу светила q .

Для наблюдений светил в данном альмукантарате рассчитываются их позиционные углы q по одной из формул

$$\sin q = \frac{\cos \varphi \sin A}{\cos \delta} \quad (7.24)$$

или

$$\sin q = \frac{\cos \varphi \sin t}{\sin z} = k \sin t, \quad (7.25)$$

где

$$t = s - \alpha; \quad k = \cos \varphi \operatorname{cosec} z = \text{const}.$$

Вычисление параллактических углов с точностью до десятых долей градуса можно производить с помощью логарифмической линейки. В процессе наблюдений при появлении звезды в поле зрения трубы, поставленной на зенитное расстояние z , движением азимутального винта вращают верхнюю часть теодолита до тех пор, пока звезда не пройдет через отсчет позиционного круга, равный ее параллактическому углу q . После этого теодолит остается неподвижным по азимуту, а звезда в ее видимом движении по суточной параллели пройдет через центр поля зрения — точку O . Подвижная нить микрометра устанавливается на 1,5—2 оборота от нуля-пункта гребенки (отсчет $M = 10^{06}$) навстречу видимому движению звезды. При подходе звезды к подвижной нити включается хронометр, а наблюдатель, вращая рукоятки ручного привода контактного микрометра, удерживает подвижную нить микрометра на изображении звезды в пределах трех оборотов винта. При этом на ленте хронографа автоматически производится запись моментов контактирования.

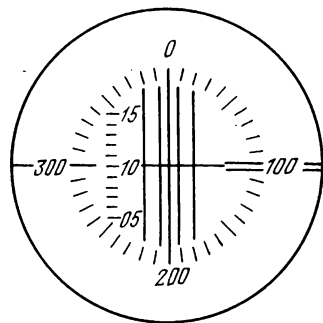


РИС. 78

Таким образом осуществляется наблюдение всех n звезд серии.

5. Составление рабочих эфемерид. Подготовка к наблюдениям

Составление рабочих эфемерид. Указанные в пункте 1 эфемериды для наблюдений способом равных высот включают яркие звезды до 6-й величины, видимые места которых публикуются в *Астрономическом ежегоднике СССР*.

В эфемериде на каждый полный градус широты даются следующие данные:

- номер звезды по *Астрономическому ежегоднику*;
- название звезды;
- величина (блеск);
- местное звездное время s прохождения звезды через данный альмукантарат;
- дифференциальное изменение Δs звездного времени при изменении широты на 1° ;
- азимут звезды A в момент ее прохождения через данный альмукантарат (азимут отсчитывается от точки севера);
- дифференциальное изменение ΔA азимута при изменении широты на 1° ;
- прямое восхождение звезды α (до минуты).

Эфемериды вычислялись по следующим формулам:

$$\cos t = \cos z_0 \sec \varphi_0 \sec \delta - \operatorname{tg} \varphi_0 \operatorname{tg} \delta;$$

$$s = \alpha \pm t,$$

где плюс — для звезд в западной стороне неба, минус — для звезд в восточной стороне неба;

$$\sin A = -\cos \delta \sin t \operatorname{cosec} z_0;$$

$$A_E = A; \quad A_W = 360^\circ - A.$$

Для наилучшего использования указанных таблиц при наблюдениях рекомендуется заранее проинтерполировать на широту пункта φ данные s и A для всех звезд, пересекающих данный альмукантарат в предполагаемом для наблюдений промежутке времени, и затем составить рабочие эфемериды, расположив звезды строго в порядке возрастания времени их наблюдений.

Если наблюдения будут производиться при неподвижном по азимуту теодолите с помощью описанного выше позиционного устройства контактного микрометра, то необходимо рассчитать параллактические углы звезд по формуле (7.24) или (7.25).

Пример составления рабочих эфемерид для наблюдений восьми звезд в промежутке звездного времени $14^{\text{h}}50^{\text{m}} - 15^{\text{h}}40^{\text{m}}$ на пункте с приближенной широтой $\varphi_0 = 42^\circ 42'$ приведен в табл. 35.

При пользовании рабочими эфемеридами легко будет составить любую необходимую программу наблюдений, причем ни одна звезда, необходимая для серии, не ускользнет от внимания наблюдателя.

Т а б л и ц а 35

Рабочие эфемериды звезд

$$\varphi_0 = 42^\circ 42', \quad z_{\text{эф}} = 45^\circ, \quad \sin q = \frac{\cos \varphi_0}{\sin z_{\text{эф}}} \cdot \sin t; \quad \frac{\cos \varphi_0}{\sin z_{\text{эф}}} = 1,039$$

Номер звезды	Величина	s	A	α	t	q°	q^{g}
1	2	3	4	5	6	7	8
424	2,1	$14^{\text{h}}57^{\text{m}}$	$120,2^\circ$	$17^{\text{h}}33^{\text{m}}$	$2^{\text{h}}36^{\text{m}}$	$40,8^\circ$	$45,3^{\text{g}}$
395	4,8	15 02	152,4	16 20	1 18	20,3	22,6
269	4,8	06	312,6	10 27	4 39	77,2	85,8
323	5,0	11	223,0	13 15	1 56	30,2	33,6
493	4,4	16	16,9	20 11	4 55	86,1	95,6
337	4,3	23	210,3	13 59	1 24	21,9	24,3
271	5,0	27	340,7	10 31	4 56	87,6	97,4
495	4,3	34	47,2	20 12	4 38	76,8	85,4

П р и м е ч а н и е. При наблюдениях с подвижным по азимуту теодолитом графы 5, 6, 7, 8 не заполняются.

Подготовка теодолита к наблюдениям. Для наблюдений теодолит устанавливают на столбе или штативе, тщательно горизонтируют с помощью талькоттовского уровня, чтобы в любом азимуте пузырек уровня уходил не более чем на 1—2 деления; диаметр 0—180° горизонтального лимба ориентируют в меридиане нулем на Север. Ориентирование осуществляется с точностью 2—3', пользуясь таблицей высот и азимутов Полярной, либо по местному предмету, азимут которого определен заранее с той же точностью.

Перед наблюдениями фокусируют трубу на бесконечность по Полярной, проверяют горизонтальность подвижной нити и, если нужно, исправляют место зенита вертикального круга и коллимационную ошибку для средней вертикальной нити. Абсолютные значения места зенита и коллимационной ошибки не должны превышать одной минуты.

При работе с контактными микрометром на каждом астрономическом пункте определяют ширину контактов микрометра. Каждый вечер определяют мертвый ход винта микрометра.

Хронограф, хронометр, блок питания и пульт управления устанавливают на столе вблизи теодолита. Перед наблюдениями проверяют действие хронографа, правильность печати на ленте контактов хронометра и микрометра.

Каждый вечер (до и после наблюдений) определяется параллакс марок (перьев) хронографа. Для этого при работе с маркопечатающим хронографом необходимо включить хронометр одновременно в цепь хронометра и в цепь микрометра, соединив проводником крайние гнезда хронометра и микрометра. В этом случае при пуске хронографа в действие на ленте будут отпечатываться при наличии параллакса две рядом лежащие точки от секундных ударов хронометра. Расстояние между этими точками, выраженное в масштабе секунд, и есть параллакс марок.

За окончательное значение параллакса принимается среднее из десяти отпечатков.

Для других типов хронографов, пишущих двумя перьями, на ленте получается запись секундных контактов хронометра для обоих перьев.

При наблюдениях с подвижным по азимуту теодолитом поверяется работа механизма для вращения алидадной части. Вращение должно быть плавным, без рывков на всех необходимых скоростях. Желательно до начала рабочих наблюдений составить график зависимости показаний вольтметра от азимутов звезд.

Перед наблюдениями поверяются освещение поля зрения трубы и работа ручников. Теодолит устанавливают на столбе (штативе) за 1,5—2 ч до начала наблюдений. Заканчивают подготовку второй поверкой горизонтирования теодолита. После этого трубу теодолита устанавливают на зенитное расстояние 45° 0 с погрешностью, не превышающей 1—2'. Надежно закрепляют зажимные

винты трубы и талькоттовского уровня и откидывают его ограничительную вилку. Пузырек талькоттовского уровня приводят на середину шкалы элевационным винтом.

6. Наблюдения

Общий порядок наблюдений состоит из:

приема радиосигналов времени первой радиостанции; наблюдений серии из 12—16 звезд;

приема радиосигналов времени второй радиостанции.

Прием радиосигналов времени желательно производить не реже чем через два часа.

Наблюдения звезд с помощью контактного микрометра производятся в следующем порядке:

перед началом наблюдения серии звезд отсчитывают показания термометра и барометра и подправляют, если нужно, положение пузырька талькоттовского уровня;

за 3—4 мин до момента с наблюдения данной звезды верхняя часть теодолита устанавливается по азимуту A ;

при появлении изображения звезды в поле зрения трубы добиваются с помощью наводящего винта, чтобы изображение звезды было рядом с вертикальной нитью; одновременно включают механизм для вращения алидады и с помощью графика подбирают и корректируют частоту вращения, чтобы изображение звезды перемещалось параллельно вертикальной нити. Если наблюдения производят при неподвижном по азимуту теодолите, то после появления звезды в поле зрения трубы, действуя наводящим винтом алидады, добиваются такого положения, чтобы звезда прошла через отсчет позиционного круга, равный параллактическому углу звезды. После этого теодолит остается неподвижным по азимуту;

подвижную нить микрометра устанавливают на расстоянии около полутора оборотов навстречу движению звезды. С приближением изображения звезды к подвижной нити отсчитывают по талькоттовскому уровню и дают сигнал для пуска хронографа;

с момента вступления звезды на подвижную нить последнюю удерживают на звезде, плавно вращая обеими руками рукоятки микрометра, в пределах трех полных оборотов винта. После этого дают сигнал остановки хронографа и снова отсчитывают талькоттовский уровень.

Подобным образом наблюдают все звезды серии. В конце наблюдений серии звезд вторично отсчитывают показания барометра и термометра.

Помощник наблюдателя производит записи наблюдений звезд в журнале, по команде наблюдателя осуществляет пуск и остановку хронографа, следит за правильностью его работы. В обязанности помощника входят также ведение записей на ленте хронографа, разметка и расшифровка ленты.

В начале ленты записываются название пункта и дата наблюдений. При наблюдениях звезды записываются ее номер, а также начало минуты по хронометру (в разрыве секундных меток хронометра, соответствующих целой минуте).

Для облегчения последующей расшифровки ленты полезно отметить на ленте момент прохождения подвижной нити микрометра через нуль-пункт гребенки. Эта отметка в виде условного знака делается при наблюдениях звезды по команде наблюдателя, например словом «середина».

В промежутках между наблюдениями звезд, если имеется время, помощник производит разметку секунд, подписывая каждую пятую. При разметке ленты необходимо сначала установить, какому показанию по секундной стрелке хронометра соответствует первый контакт после разрыва записи секунд на целой минуте. Для разных хронометров это показание может быть различно (0,5; 1,0; 1,5^s и т. д.).

7. Обработка наблюдений

Обработка наблюдений по способу равных высот состоит из: расшифровки ленты и обработки журнала наблюдений, вычисления свободных членов уравнений поправок, составления и решения нормальных уравнений, вывода окончательных значений координат пункта и оценки точности их определения.

Расшифровка ленты и обработка журнала наблюдений. Расшифровка ленты производится с помощью прибора ЦНИИГАиК или клиновой палетки, вычерченной на прозрачной основе. Перед расшифровкой должна быть закончена указанная выше разметка ленты. При работе с контактным микрометром, имеющим 9 или 10 контактов, вполне достаточно брать в обработку один оборот микрометра, приходящийся на середину между ограничительными нитями. Примерная середина этого оборота легко опознается на ленте по условной отметке, сделанной при наблюдениях.

Расшифровка ленты состоит в опознавании меток, соответствующих контактам данного оборота, и в измерении расстояний, выраженных в масштабе секунд, между метками контактов и ближайших к ним меток младших секунд. Указанные измерения производятся с точностью 0,01^s. Принятый оборот должен быть одним и тем же для всех звезд серии. Результаты расшифровки ленты записываются в журнале наблюдений. Образец записей наблюдений в журнале приведен в табл. 36. Обработка журнала наблюдений производится в следующем порядке.

1. Обработывается прием радиосигналов времени двух радиостанций, в интервале между которыми наблюдались звезды данной серии. Приведем образец записи.

Выписка из журнала наблюдений

Астрономический пункт *Ивановка* ($\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$
 $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$)

Теодолит АУ 2"/10" № 3213, $\frac{\tau}{2} = 0,802''$. Нуль шкалы в середине.

$$\text{Хронометр № 1856} \quad \Delta l_i = (\text{Л} - \text{П}) \frac{\tau}{2}$$

Дата 7/8 июня 1971 г.

$$\Delta T_a = -0,021^s \cos 45^\circ = -0,015^s; \quad \Delta T_p = +0,018^s, \quad .$$

$$\Delta T = 0,018^s - 0,015^s = +0,003^s.$$

№ 287 $s = 13^h 38^m$		$m = 4,0$ $A = 231,2^\circ$	№ 470 $s = 13^h 50^m$		$m = 4,6$ $A = 23,7^\circ$
10,1—13,3	—3,2	$\Delta l_i = -2,6''$	13,0—10,5	+2,5	$\Delta l_i = +1,8''$
10,1—13,4	$\frac{-3,3}{-3,25}$		12,8—10,8	$\frac{+2,0}{+2,25}$	
	$13^h 37^m 53,60^s$			$13^h 50^m 33,85^s$	
	56,30			38,97	
	59,01			43,99	
	38 01,53			49,60	
	04,27			55,05	
	07,05			51 00,33	
	09,93			05,95	
	12,83			11,23	
	15,50			16,39	
$T'_H = 13^h 38^m 04,45^s$			$T'_H = 13^h 50^m 55,09^s$		
$\Delta T = 0,00$			$\Delta T = 0,00$		
$T_H = 13^h 38^m 04,45^s$			$T_H = 13^h 50^m 55,09^s$		

Результаты обработки приемов радиосигналов времени

Дата 7/8 июня 1971 г.

$$1 \text{ прием } u_{0_1} = +3,559^s \text{ в момент } X_1 = 13^h 23^m 35^s$$

$$2 \text{ прием } u_{0_2} = +2,594^s \text{ — » — } X_2 = 15^h 23^m 56^s$$

$$u_0 = +3,076^s \text{ в момент } X = \frac{1}{2}(X_1 + X_2) = 14^h 23,8^m$$

$$\omega^h = \frac{u_{0_2} - u_{0_1}}{(X_2 - X_1)^h} = \frac{2,594 - 3,559}{2} = -0,482^s.$$

2. Подсчитывается поправка в вычисляемое зенитное расстояние звезды (поправка в свободный член уравнения поправок) за наклон оси талькоттовского уровня, если нуль деления шкалы находится:

вблизи объектива

$$\Delta l_i = [m - (\mathcal{L} + \Pi)] \frac{\tau}{2}; \quad (7.26)$$

вдали от объектива

$$\Delta l_i = [(\mathcal{L} + \Pi) - m] \frac{\tau}{2}; \quad (7.27)$$

в середине

$$\Delta l_i = (\mathcal{L} - \Pi) \frac{\tau}{2}, \quad (7.28)$$

При вычислении наклона оси уровня в полуделениях берется среднее из двух значений, отсчитанных до и после наблюдения звезды.

3. Подсчитывается до 0,01^s средний момент наблюдения T'_H звезды из k моментов контактирования, принятых в обработку. Полученный средний момент исправляется поправками за влияние суточной аберрации и за параллакс марок хронографа по формуле

$$\Delta T = \Delta T_a + \Delta T_p, \quad (7.29)$$

где

$$\Delta T_a = -0,021^s \cos z. \quad (7.30)$$

Вычисление свободных членов уравнений и поправок (табл. 37). Свободный член уравнения поправок (7.5), с учетом поправки за уровень, вычисляются по формуле

$$l' = (z'_i - z_{\text{эф}}) + \Delta l'_i + \Delta l_{w_i} + \Delta l_{\gamma} \pm N, \quad (7.31)$$

где z'_i — зенитное расстояние звезды серии, вычисленное с предварительными (счислимыми) значениями координат пункта φ_0 и λ_0 и наблюдаемым моментом T_H ; $z_{\text{эф}}$ — зенитное расстояние альмуkantарата; $\Delta l'_i$ — поправка за наклонность талькоттовского уровня; Δl_{w_i} — поправка за ускорение движения звезды по зенитному расстоянию; Δl_{γ} — поправка за ширину контактов и мертвый ход контактного микрометра; N — произвольное целое число секунд, одинаковое для всех звезд данной серии.

С применением арифмометра зенитное расстояние звезды вычисляется по формуле (7.8)

$$\cos z'_i = \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta)(1 + \cos t_0) - \cos(\varphi_0 + \delta)(1 - \cos t_0)],$$

где

$$t_0 = T_H + u_0 + \omega(T_H - X) - \alpha.$$

Вычисление свободных членов уравнений поправок

$$7.6.1971 \text{ г. } \cos z_{0i} = \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_i) (1 + \cos t_{0i}) - \cos(\varphi_0 + \delta_i) (1 - \cos t_{0i})]$$

Действия	Номер звезды	
	287	470
T_{H_i}	13 ^h 38 ^m 04,45 ^s	13 ^h 50 ^m 55,09 ^s
u_0	+3,08	3,08
$\omega(T_{H_i} - X)$	+0,37	+0,26
s_i	13 38 07,90	13 50 58,43
αt	11 21 54,32	19 16 23,08
t_{0i}	2 16 13,58	5 25 24,65
t'_{0i}	34° 03' 23,70"	81° 21' 09,75"
φ_0	44 58 40,00	44 58 40,00
δ_i	10 44 34,79	73 17 00,49
$\varphi_0 - \delta_i$	34 14 05,21	28 18 20,49
$\varphi_0 + \delta_i$	55 43 14,79	118 15 40,49
$\cos(\varphi_0 - \delta_i)$	0,826739	0,880430
$1 + \cos t_{0i}$	1,828485	1,150351
$\cos(\varphi_0 + \delta_i)$	0,563227	-0,473492
$1 - \cos t_{0i}$	0,171515	0,849649
$\cos z'_{0i}$	0,707539	0,707552
z'_{0i}	44° 57' 53,8"	44° 57' 50,0"
$z_{\text{эф}}$	45 00 00,0	45 00 00,0
l_{0i}	-2 06,2	-2 10,0
Δl_i	-2,6	+1,8
Δl_{W_i}	0,0	0,0
Δl_{γ_i}	+1,1	-1,1
l_i	-2 07,7	-2 09,3
$\pm N$	+2 09,0	+2 09,0
l'_i	+1,3"	-0,3"
A_i	231,2°	23,7°

Поправку за уровень Δl_i вычисляют в журнале по формулам (7.26), (7.27) или (7.28).

Поправку за ускорение вычисляют по формуле (7.10)

$$\Delta l_{W} = \Delta z_{W} = p \frac{d^2 z}{dt^2} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2,$$

где n — число контактов, принятых в обработку, $(T_n - T_1)$ — промежуток времени между моментами наблюдения на крайних контактах, выраженный в секундах.

$$p = 0,454 \frac{n+1}{n-1}.$$

Величину $\frac{d^2z}{dt^2}$ выбирают из табл. 52 АТ по аргументам φ_0 и A . Поправку за ширину контактов и мертвый ход вычисляют по формуле (5.64), с учетом знаков, указанных в пункте 3 § 40

$$\Delta l_v = [\pm \text{Шк} - \text{Мх}] \frac{R}{2}.$$

Значение N в целых секундах должно быть таким, чтобы свободные члены уравнений поправок при аналитическом уравнивании данной серии были минимальными по абсолютному значению. Это позволит уменьшить число десятичных знаков при уравнивательных вычислениях.

В случае растянутости промежутка времени при наблюдениях серии звезд (свыше 2 ч) или в случае быстрого изменения температуры или давления воздуха необходимо учесть влияние изменения рефракции на величину свободного члена l . Для этого нужно по отсчетам температуры и атмосферного давления в начале и в конце наблюдений серии звезд привести все наблюдения к началу серии по следующей формуле (для $z_{\text{эф}} = 45^\circ$):

$$\Delta l_{t, B} = \pm 0,20'' (\Delta t^\circ) \pm 0,08'' (\Delta B), \quad (7.32)$$

где Δt° — изменение температуры, в градусах, ΔB — изменение давления, мм рт. ст.¹

В формуле (7.32) знак плюс соответствует увеличению температуры и давления, а минус — их уменьшению. Для $z_{\text{эф}} = 30^\circ$ формула (7.32) примет вид

$$\Delta l_{t, B} = \pm 0,12'' (\Delta t^\circ) \pm 0,05'' (\Delta B). \quad (7.33)$$

Составление и решение нормальных уравнений; оценка точности уравненных значений x и y из одной серии звезд. Прежде чем приступить к составлению и решению нормальных уравнений, производится графическое уравнивание результатов наблюдений по вычисленным значениям свободных членов уравнений поправок. Графическое уравнивание при определении пунктов Лапласа применяется с целью выявления грубых промахов в наблюдениях звезд, а также в вычислениях свободных членов. Производится графическое уравнивание точно так же, как это было описано в способе Сомнера. Грубой погрешностью считается такая, при которой отклонение линии положения от вероятнейшей окружности превышает утроенное значение средней квадратической погрешности единицы веса. Для наблюдений теодолитом АУ 2"/10" с контактным микрометром значение средней квадратической погрешности единицы веса по материалам производственных наблюдений составляет 0,8—0,9". При этих условиях отклонение линии положения от вероятнейшей окружности не должно пре-

¹ мм рт. ст. = 133,322 Па.

Уравнения поправок

Номер звезды	A	a	b	c	l	s	P
287	231,2°	-1	+0,63	+0,78	+1,30	+1,71	1
357	157,9	-2	+0,93	-0,37	+2,40	+1,96	1
470	23,7	-1	-0,92	-0,40	-0,30	-2,62	1
457	43,9	-1	-0,72	-0,69	+1,60	-0,81	1
467	32,0	-1	-0,85	-0,53	+0,60	-1,78	1
422	96,7	-1	+0,12	-0,99	+3,90	+2,03	1
247	305,0	-1	-0,57	+0,82	+0,20	-0,55	1
281	253,2	-1	+0,29	+0,96	-0,30	-0,05	1
272	273,8	-1	-0,07	+1,00	-0,50	-0,57	1
293	240,8	-1	+0,49	+0,87	-0,20	+0,56	1
483	28,3	-1	-0,88	-0,47	+0,40	-1,95	1
246	321,8	-1	-0,79	+0,62	-0,50	-1,67	1
409	130,2	-1	+0,65	-0,76	+4,20	+3,09	1
254	316,0	-1	-0,72	+0,69	-1,10	-2,13	1
410	132,1	-1	+0,67	-0,74	+3,70	+2,63	1
337	200,4	-1	+0,94	+0,35	+2,50	+2,79	1
Суммарное		-16	-0,80	+1,14	+18,30	+2,64	$-\frac{1}{16}$

вышать 2,5". При обнаружении грубых промахов вычисление ошибочных свободных членов тщательно проверяется, начиная с проверки правильности расшифровки хронографической ленты, вычислений в журнале и ведомости свободных членов. Если погрешности в вычислениях найти не удалось, то такая звезда исключается из дальнейшей обработки, как ошибочно наблюдаемая.

После графической проверки правильности вычисления свободных членов составляется таблица коэффициентов и свободных членов уравнений поправок. При счете азимутов звезд от точки Севера уравнение поправок для каждой звезды имеет вид

$$a_i \zeta + b_i x + c_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P = 1,$$

где

$$a = -1, \quad b_i = -\cos A_i, \quad c_i = -\sin A_i.$$

При определениях на пунктах Лапласа значение поправки к эфемеридному зенитному расстоянию $z_{\text{эф}}$ знать не требуется. Поэтому при решении системы n уравнений поправок по методу наименьших квадратов неизвестное ζ целесообразно исключить, применяя при составлении нормальных уравнений первое правило Шрейбера. В этом случае к уравнениям поправок данной серии звезд добавляется суммарное уравнение вида

$$[a] \zeta + [b_i] x + [c_i] y + [l_i] = v \text{ с весом } P = -\frac{1}{n}, \quad (7.34)$$

где n — число звезд.

Система нормальных уравнений с двумя неизвестными будет

$$\left. \begin{aligned} [Pbb]x + [Pbc]y + [Pbl] &= 0; \\ [Pbc]x + [Pcc]y + [Pcl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7.35)$$

Система нормальных уравнений (7.35) может быть решена как путем последовательного исключения неизвестных по схеме Гаусса, так и обычным алгебраическим путем, с помощью определителей. Оценка точности уравненных величин в каждой серии звезд производится точно так же, как в способе Сомнера (см. гл. 6). Пример уравнивания приведен в табл. 38 и 39.

Поправки уравненных значений x и y за влияние короткопериодических членов нутации. Если видимые координаты звезд не исправлялись поправками за короткопериодические члены нутации, то при окончательных вычислениях этими поправками необходимо

Т а б л и ц а 39

Нормальные уравнения

	b]	c]	l]	s]
[Pb [Pc [Pl	+7,65	+0,34 +8,24	+11,37 -13,10 +44,36	+19,36 -4,52 +42,63
Контроль	-12,46	+14,16	-1,73	-0,03

Решение нормальных уравнений с помощью определителей

Нормальные уравнения

$$7,65x + 0,34y + 11,37 = 0;$$

$$0,34x + 8,24y - 13,10 = 0.$$

$$\Delta = +62,9204 \quad \Delta_x = -98,1428 \quad \Delta_y = +104,0808$$

$$x = -\frac{98,1428}{62,9204} = -1,56'' \quad y = +\frac{104,0808}{62,9204} = +1,65''$$

$$P_x = \frac{62,9204}{8,24} = 7,64 \quad P_y = \frac{62,9204}{7,65} = 8,22$$

$$[v^2] = [Pl] + [Pbl]x + [Pcl]y; \quad (7.36)$$

$$[v^2] = 44,36 - 17,75 - 21,63 = 4,98.$$

Оценка точности

$$\mu = \sqrt{\frac{4,98}{13}} = 0,62''.$$

$$m_x = \frac{0,62''}{\sqrt{7,64}} = 0,22''; \quad m_y = \frac{0,62}{\sqrt{8,22}} = 0,22''.$$

исправить уравненные значения x и y в каждой серии звезд по формулам (5.80), (5.81)

$$\delta x_{к.п} = g' \cos(G' + s_{ср});$$

$$\delta y_{к.п} = 15f' \cos \varphi + g' \sin \varphi \sin(G' + s_{ср}),$$

или

$$\begin{aligned} \delta y_{к.п} &= \left[f' + \frac{1}{15} g' \operatorname{tg} \varphi \sin(G' + s_{ср}) \right] 15 \cos \varphi = \\ &= [f' + P_{ср} g'] 15 \cos \varphi. \end{aligned} \quad (7.37)$$

Величины g' и G' интерполируют на средний момент $s_{ср}$ наблюдения серии звезд. Для удобства интерполирования можно пользоваться средним моментом подачи радиосигналов времени $T_0 = \frac{1}{2}(T'_0 + T''_0)$. Интерполяционный множитель с этим аргументом выбирается из табл. 20 АТ. Величина f' выбирается на 0^h эфемеридного времени. При вычислениях $\delta y_{к.п}$ величину

$$P_{ср} = \frac{1}{15} \operatorname{tg} \varphi \sin(G' + s_{ср}) \quad (7.38)$$

выбирают из табл. 34 АТ по аргументам φ и $(G' + s_{ср})$.

Пример вычисления поправок $\delta x_{к.п}$ и $\delta y_{к.п}$ приведен в табл. 40.

Т а б л и ц а 40

Вычисление поправок $\delta x_{кп}$ и $\delta y_{кп}$
за влияние короткопериодических членов нутации
 $\varphi_0 = 44^\circ 58'$

Действия	Серия 3-я
Дата	7/8—VI—1971 г.
$T_0 = \frac{1}{2}(T'_0 + T''_0)$	19,4 ^h
$\frac{1}{48}(T'_0 + T''_0)$	0,79
$s_{ср}$	14,4 ^h
G'	19,3
$G' + s_{ср}$	9,7
g'	0,108''
$\cos(G' + s_{ср})$	-0,8241
$\delta x_{кп} = g' \cos(G' + s_{ср})$	-0,09''
$P_{ср}$	0,038
f'	+0,006 ^s
$P_{ср} g'$	0,004
$f' + P_{ср} g'$	+0,0102 ^s
$15 \cos \varphi$	10,571
$\delta y_{кп}$	+0,106''

8. Вывод окончательных значений широты и долготы пункта из наблюдений k серий звезд. Оценка точности

Окончательные значения условных составляющих уклонения отвесной линии x и y вычисляются как средние весовые из результатов определений k серий звезд по формулам

$$x_{\text{ср}} = \frac{[P_x x_i]}{P_x} \quad \text{с весом } P_{x_{\text{ср}}} = [P_x] \quad (7.39)$$

$$y_{\text{ср}} = \frac{[P_y y_i]}{[P_y]} \quad \text{с весом } P_{y_{\text{ср}}} = [P_y]. \quad (7.40)$$

Оценка точности полученных результатов производится по известным формулам для средней квадратической погрешности среднего весового

$$M_x = \sqrt{\frac{[P_x v_x^2]}{(k-1)[P_x]}}; \quad (7.41)$$

$$M_y = \sqrt{\frac{[P_y v_y^2]}{(k-1)[P_y]}}; \quad (7.42)$$

где v_x и v_y — уклонения значений x и y в каждой серии от их среднего весового значений, полученных из k серий звезд.

Вычисление широты и долготы пункта производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 + x_{\text{ср}} \quad \text{с весом } P_\varphi = [P_x]; \\ \lambda' &= \lambda_0 + \frac{y_{\text{ср}}}{15} \sec \varphi \quad \text{с весом } P_{\lambda'} = [P_y] \cos^2 \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (7.43)$$

Полученную долготу пункта λ' необходимо исправить поправкой за лично-инструментальную разность наблюдателя по формуле

$$\lambda = \lambda' + \partial\lambda. \quad (7.44)$$

Лично-инструментальная разность $\partial\lambda$ определяется до и после периода полевых работ на одном из основных пунктов (см. [27] прил. 57) и выводится как разность

$$\partial\lambda = \lambda_{\text{осн}} - \lambda_{\text{опр}}, \quad (7.45)$$

где $\lambda_{\text{осн}}$ — точная долгота основного пункта ($M_\lambda \leq 0,005^s$); $\lambda_{\text{опр}}$ — результат определения долготы на основном пункте.

В соответствии с требованиями Инструкции лично-инструментальная разность определяется каждый раз не менее чем из восьми серий по 12—16 звезд в каждой серии.

При вычислении окончательного значения лично-инструментальной разности используются результаты обеих ее определений

Пункт *Ивановка*
 Теодолит АУ 2"/10" № 3213

Наблюдатель *А. В. Мазеев*
 Хронометр № 1856

Дата	Номер серий	Число звезд	μ	x	P_x	v_x	y	P_y	v_y
1971 г.									
Июнь 6	1	13	0,50	-0,90	5,8	-0,48	+2,14	7,5	-0,45
6	2	15	0,70	-1,80	7,0	+0,42	+1,38	7,3	+0,31
7	3	16	0,62	-1,56	7,6	+0,18	+1,65	8,2	+0,04
7	4	14	0,73	-0,50	6,0	-0,88	+1,52	7,5	+0,17
9	5	17	0,58	-1,77	7,8	+0,38	+2,07	8,3	-0,38
9	6	16	0,65	-1,50	7,4	+0,42	+1,38	8,0	+0,31

$$x_{\text{ср}} = -1,38'' \quad [P_x] = 41,6; \quad y_{\text{ср}} = +1,69'' \quad [P_y] = 46,8$$

$$\varphi = \varphi_0 + x_{\text{ср}} = 44^\circ 58' 40,00'' - 1,38'' = 44^\circ 58' 38,62''$$

$$P_\varphi = 41,6$$

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,500^{\text{s}} + 0,159^{\text{s}} = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,659^{\text{s}}$$

$$P_\lambda = 46,8 \cos^2 \varphi = 23,4$$

$$M_\varphi = M_x = \sqrt{\frac{[P_x v_x^2]}{(k-1)[P_x]}} = \sqrt{\frac{8,756}{5 \cdot 41,6}} = 0,20'';$$

$$M_y = \sqrt{\frac{[P_y v_y^2]}{(k-1)[P_y]}} = \sqrt{\frac{4,417}{5 \cdot 46,8}} = 0,14'';$$

$$M_{\lambda'} = \frac{M_y}{15} \sec \varphi = 0,013^{\text{s}};$$

$$\partial \lambda = +0,022^{\text{s}};$$

$$\lambda = \lambda' + \partial \lambda = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,659^{\text{s}} + 0,022^{\text{s}} = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,681^{\text{s}};$$

$$M_{\partial \lambda} = 0,009^{\text{s}};$$

$$M_\lambda = \sqrt{M_{\lambda'}^2 + M_{\partial \lambda}^2 + M_{\delta \lambda}^2} = \sqrt{(0,013)^2 + (0,009)^2 + (0,016)^2} = 0,022^{\text{s}}.$$

на основном пункте. При этом величина $\partial \lambda$ подсчитывается по формуле

$$\partial \lambda = \frac{[P_{\Delta \lambda} \Delta \lambda_i]}{[P_{\Delta \lambda}]} \quad \text{с весом } P_{\partial \lambda} = [P_{\Delta \lambda}], \quad (7.46)$$

где $\Delta \lambda_i$ — значение личной разности, полученное из каждой серии звезд; $P_{\Delta \lambda} = P_y \cos^2 \varphi_{\text{осн}}$ — вес значения $\Delta \lambda$.

Средние квадратические погрешности определения широты и долготы пункта вычисляются по следующим формулам:

$$M_\varphi = M_x, \quad (7.47)$$

$$M_\lambda = \sqrt{M_{\lambda'}^2 + M_{\partial \lambda}^2 + M_{\delta \lambda}^2}. \quad (7.48)$$

В формуле (7.48) имеем

$$M_{\lambda'} = \frac{M_y}{15} \sec \varphi, \quad (7.49)$$

$$M_{\delta\lambda} = \sqrt{\frac{[P_{\Delta\lambda} v_{\Delta\lambda}^2]}{(r-1)P_{\Delta\lambda}}}, \quad (7.50)$$

где $v_{\Delta\lambda}$ — уклонение отдельных результатов определения личной разности из каждой серии звезд от среднего весового; r — число наблюдаемых серий звезд в обоих определениях личной разности; $M_{\delta\lambda} = 0,015^s$ — величина среднего квадратического колебания поправки за лично-инструментальную разность, выведенная из статистических исследований производственных определений астрономическим теодолитом с контактным микрометром.

В соответствии с требованиями Инструкции средняя квадратическая погрешность $M_{\lambda'}$ определения долготы пункта, выведенная по внутренней сходимости, не должна превышать $0,022^s$; средняя квадратическая погрешность $M_{\delta\lambda}$ определения лично-инструментальной разности не должна превышать $0,012^s$, предельное значение разности $d = \delta\lambda_2 - \delta\lambda_1$ не должно превышать $0,008^s$.

Пример вывода окончательных значений x и y (φ и λ) приведен в табл. 41.

Окончательные значения φ и λ приводятся к центру геодезического знака и к среднему полюсу.

§ 48. ПОНЯТИЕ О СОВМЕСТНОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ПАР ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ

Для обоснования способов астрономических определений географических координат и азимута немалое значение имеет величина промежутка времени, необходимого для данных определений. Дело в том что с течением времени могут изменяться как внешние условия наблюдений (температура, давление, влажность, наклон однородных слоев воздуха и т. д.), так и взаимное положение частей прибора.

Опыт астрономических и геодезических измерений показывает, что прибор «живет» во времени. Поэтому для тех способов астрономических определений, в которых условно полагают неизменными внешние условия наблюдений и взаимное положение частей прибора, всегда стремятся сократить время, затрачиваемое на наблюдения группы звезд. В этом смысле способы определения широты и времени по независимым наблюдениям пар звезд, которые выполняются в течение нескольких минут, будут всегда предпочтительнее способов определения φ и λ по наблюдениям серий из n звезд, которая наблюдается в течение 1,5—2 ч. Именно поэтому в практике точных астрономических определений всеобщее признание получили способы раз-

дельного определения времени (долготы) и широты по наблюдениям пар звезд на равных высотах. Небезынтересным с этой точки зрения является также известный способ совместного определения широты и долготы из наблюдений пар звезд на равных высотах, предложенный профессором В. В. Каврайским.

Рассмотрим кратко сущность этого способа с позиций общей теории зенитальных способов.

Для совместного определения x и y с равными весами ($P_x = P_y$) необходимо произвести наблюдения минимум двух пар (четырех) звезд, в плоскостях двух произвольных, взаимно перпендикулярных вертикалов, симметрично относительно зенита. Каждые две пары звезд могут наблюдаться в своих двух взаимно перпендикулярных вертикалах.

Для каждой пары звезд будем иметь два уравнения поправок вида (7.5). Исключив из них неизвестное ζ , получим уравнение для измеренной разности зенитных расстояний звезд пары

$$(b_1 - b_2)x + (c_1 - c_2)y + (z_0 - z_0) + (i_2 - i_1) \frac{\tau}{2} = v_1, \quad (7.51)$$

где v_1 — поправка измеренной разности зенитных расстояний звезд.

Для второй пары каждой четверки звезд имеется уравнение такого же вида. Из совместного решения двух уравнений вида (7.51) находят значения x и y . Веса значений x и y из каждой четверки звезд будут

$$P_x = [\cos^2 A] = 2;$$

$$P_y = [\sin^2 A] = 2.$$

Окончательные значения x и y получают как среднее арифметическое из всех наблюдаемых четверок звезд. Задача совместного определения x и y может быть также решена путем совместного решения n уравнений поправок (7.51) по методу наименьших квадратов. В этом случае вертикалы для наблюдений пар звезд должны быть равномерно распределены по азимутам.

Способ Каврайского не нашел общего признания, так как он не имеет преимуществ перед широко известными способами отдельного определения времени и широты по наблюдениям пар звезд на равных высотах — способами Цингера и Певцова.

§ 49. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ (ВРЕМЕНИ) ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ПАР ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ. СПОСОБ ЦИНГЕРА

1. Теория способа

Способ определения долготы или времени из наблюдений двух звезд ($n = 2$) на равной высоте является частным случаем рассмотренного выше способа совместного определения широты и

долготы из наблюдений n звезд ($n \geq 3$) в одном альмукантате. Для двух звезд, наблюдаемых на равной высоте, будем иметь два уравнения вида (7.5):

$$a\zeta + b_1x + c_1y + l_1 = v_1;$$

$$a\zeta + b_2x + c_2y + l_2 = v_2.$$

Вместо условия $P_x = P_y$ здесь ставится такое условие подбора звезд в паре, при котором вес уравненного значения y будет максимален, т. е.

$$P_y = \max. \quad (7.52)$$

Для достижения максимального веса уравненного значения y звезды в каждой паре необходимо наблюдать в первом вертикале, по стороны от зенита. В этом случае на основании формулы (5.53) будем иметь

$$P_{y_{\max}} = [\sin^2 A] = 2. \quad (7.53)$$

Для увеличения числа пар и обеспечения непрерывной работы на пункте звезды в парах без особого ущерба точности можно выбирать на удалении по азимуту от первого вертикала до 30° . В этом случае для получения наибольшего веса P_y на основании общей формулы веса P_y (5.41) необходимо соблюдение условий:

$$\left. \begin{aligned} [ac] &= [\sin^2 A] = 0; \\ [bc] &= [\sin A \cos A] = 0, \end{aligned} \right\} \quad (7.54)$$

которые для пары звезд означают условия симметричного выбора звезд по азимутам относительно меридиана. В функции азимутов звезд условие симметричности имеет вид

$$A_E = 360^\circ - A_W. \quad (7.55)$$

Графическое изображение условий симметричного выбора звезд в парах относительно меридиана показано на рис. 79.

При соблюдении условий симметричности (7.54) и (7.55) численное значение веса P_{y_i} для каждой пары звезд определится формулой

$$P_y = [\sin^2 A] = 2 \sin^2 A_W. \quad (7.56)$$

В зависимости от азимутов звезд пары веса P_y представлены в табл. 42.

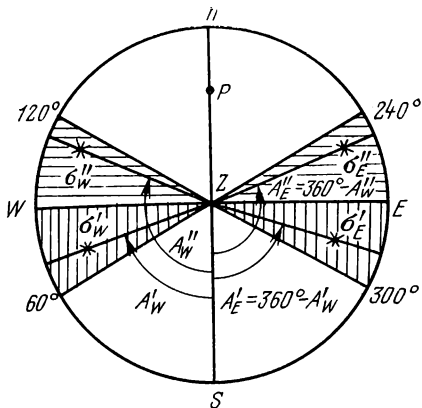


РИС. 79

A_W	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°
P_y	1,18	1,50	1,77	1,94	2,00	1,94	1,77	1,50	1,18

Численное значение y_i для каждой пары звезд, найденное из двух уравнений вида (7.5), при соблюдении условий симметричности (7.55) будет

$$y_i = - \frac{[cl]}{[cc]} \quad \text{с весом } P_{y_i} = 2 \sin^2 A_W. \quad (7.57)$$

Уравненное значение $y_{\text{ср}}$ из наблюдений n пар звезд, заключенных между двумя приемами радиосигналов времени, вычисляется как среднее весовое, т. е.

$$y_{\text{ср}} = \frac{\sum P_{y_i} y_i}{\sum P_{y_i}} \quad \text{с весом } P_{y_{\text{ср}}} = [P_{y_i}]. \quad (7.58)$$

Значение долготы пункта λ' на основании (7.43) будет

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi \quad \text{с весом } P_{\lambda'} = P_{y_{\text{ср}}} \cos^2 \varphi. \quad (7.59)$$

В случае необходимости может быть вычислена поправка хронометра u' относительно местного звездного времени в средний момент X между приемами радиосигналов времени по формуле

$$u' = u_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi \quad \text{с весом } P_{u'} = P_{y_{\text{ср}}} \cos^2 \varphi. \quad (7.60)$$

С помощью известного хода хронометра ω эта поправка может быть передана на любой момент в пределах промежутка времени между приемами радиосигналов.

Оценка точности определений производится по формулам: средняя квадратическая погрешность единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[P_{y_i} v_{y_i}^2]}{n-1}}, \quad (7.61)$$

где n — число пар звезд;

$$v_y = y_{\text{ср}} - y_i; \quad P_y = 2 \sin^2 A;$$

средняя квадратическая погрешность среднего весового $y_{\text{ср}}$ из наблюдений n пар звезд

$$m_{y_{\text{ср}}} = \frac{\mu}{\sqrt{[P_{y_i}]}}; \quad (7.62)$$

средняя квадратическая погрешность долготы (времени)

$$m_{\lambda'} = \frac{1}{15} m_{y_{cp}} \sec \varphi. \quad (7.63)$$

Таковы общие теоретические основы способа определения долготы и времени из наблюдений пар звезд на равных высотах.

В этом способе, как и в других способах астрономических определений, основанных на принципе равных высот, наиболее полно исключаются погрешности, связанные с рефракцией, гнутием трубы прибора и другими систематическими погрешностями, действующими на результаты измерений в функции зенитных расстояний светил.

На наблюдение пары звезд на равной высоте затрачивается всего 5 мин. В течение такого короткого промежутка времени можно не опасаться значительных изменений как внешних условий, так и взаимного положения частей теодолита. Кроме того, при обработке наблюдений вся сумма систематических поправок (поправка ζ) к установочному зенитному расстоянию исключается в разности измеряемых зенитных расстояний звезд каждой пары. Поэтому рассматриваемый способ определения долготы по наблюдениям пар звезд на равных высотах является одним из самых точных. Он рекомендуется инструкцией как основной способ определения времени (долготы) на пунктах Лапласа для широт до 65° .

Идея способа определения времени из наблюдений пар звезд на равных высотах была известна давно. Ее предложил в 1780 г. немецкий астроном Кёлер.

В дальнейшем исследованием этого способа занимались многие ученые. Однако потребовалось почти сто лет для того, чтобы привести этот выгоднейший, с теоретической точки зрения, способ к практическому применению.

Всестороннее исследование и разработку способа определения времени (поправки часов) из наблюдений пар звезд на соответственных высотах выполнил адъютант-астроном Пулковской обсерватории Н. Я. Цингер в 1874 г.¹ После этого исследования способ заслуженно стал называться способом Цингера. Н. Я. Цингер вывел удобные для вычислений формулы², дал теоретический анализ точности, которую можно получить данным способом, разработал методику наблюдений и, наконец, составил список 160 звездных пар, подобранных достаточно равномерно на протяжении суток.

Дальнейшие труды русских астрономов Кортаца, Витрама, Щеткина, Долгова были направлены на расширение числа пар

¹ Цингер Н. Я. Курс астрономии (часть практическая). 2-е изд. Петроград, 1915.

² Формулы Цингера для вычисления поправки часов из наблюдений двух звезд на равной высоте выведены в конечном виде. Они принципиально отличаются от дифференциальных формул, изложенных выше.

звезд и составление удобных для практического использования эфемерид, пригодных для наблюдений в широтах от 40° до 70° .

В 1928 г. коллектив астрономов Главного геодезического управления под руководством проф. К. А. Цветкова составил новые таблицы для 500 пар звезд и вычислил рабочие эфемериды этих пар для широт от $+34$ до $+70^\circ$ ¹. Координаты звезд в этих эфемеридях взяты для эпохи 1950.0.

В 1951 г. в ЦНИИГАиК составлены новые эфемериды для обеспечения астрономических работ в высоких широтах [66]. Эти эфемериды содержат 500 пар звезд. В 1960—1961 гг. изданы еще три выпуска с эфемеридами пар Цингера на эпоху 1965.0 [67, 68, 69]. Общее число пар звезд для широт от $+30^\circ$ до $+70^\circ$ составляет в настоящее время примерно 2000.

Подбор пар звезд в указанных эфемеридях производил старший научный сотрудник ЦНИИГАиК Н. А. Беляев. Под его же руководством выполнены все вычислительные работы.

Вычисления поправок часов по формулам Цингера, несмотря на изящность и простоту решения этого вопроса, были все же довольно трудоемки. Поэтому в Институте теоретической астрономии, а затем в ЦНИИГАиК были разработаны специальные таблицы, облегчающие вычисление некоторых величин, зависящих от координат звезд. Эти таблицы были названы эфемеридами для вычислений. Они составлялись и издавались на каждый год.

В 1946 г. в Институте теоретической астрономии Д. К. Куликовым была разработана новая, очень удачная форма эфемерид для вычислений по способу Цингера, существенно упрощающая процесс вычислений. Однако составление и издание объемистых таблиц на каждый год для сравнительно небольшого числа астрономов оказалось экономически невыгодным. При внедрении электронных вычислительных машин значительно проще пользоваться выведенными выше дифференциальными формулами, общими для всех зенитальных способов.

В 1930 г. военным геодезистом Ч. Ю. Витоженцем были произведены первые опытные наблюдения пар Цингера с помощью контактного микрометра.

Обстоятельная разработка методики наблюдений по способу Цингера астрономическим теодолитом с контактным микрометром выполнена в ЦНИИГАиК А. П. Колупаевым (Труды ЦНИИГАиК, вып. 124. М., 1959).

В настоящее время в ЦНИИГАиК разработана новая методика наблюдений с помощью фотоэлектрической регистрации звездных прохождений. Фотоэлектрический метод наблюдения прохождений звезд, объективный в своей основе, полностью исключает

¹ Рабочие эфемериды 500 пар звезд для определения времени по способу соответствующих высот (способ Цингера). Книги 1, 2, 3, и 4. М.—Л., Госгеолтехиздат, 1932.

влияние личных погрешностей наблюдателя и тем самым значительно повышает точность астрономических определений.

2. О составлении рабочих эфемерид пар звезд

Из условий симметричности (7.54) и (7.55) выбора звезд в парах относительно меридиана, при равенстве их зенитных расстояний $z_W = z_E$ вытекает требование равенства склонений звезд $\delta_W = \delta_E$ и равенства абсолютных значений их часовых углов $t_W = t_E$ (рис. 80).

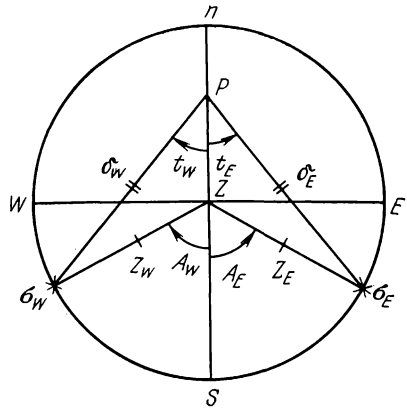


РИС. 80

Подобрать пары звезд с абсолютно равными склонениями практически невозможно. Однако при условии достаточно малой разности склонений ($\delta_W - \delta_E$) подбор пар звезд не составляет особых затруднений. В этом случае, конечно, для равных зенитных расстояний звезд пары условия симметричности (7.54) и (7.55), а также равенство $t_W = t_E$ выполняться строго не будут.

Если подобрана пара звезд с близкими по величине склонениями, то вопрос о вычислении эфемерид сводится к решению следующей задачи:

определить, когда две звезды, находясь по разные стороны от меридиана, достигнут в данном месте, широта которого известна, одинаковой высоты, и вычислить для этого момента s_0 зенитное расстояние и азимуты звезд. Рассмотрим решение этой задачи. Момент s_0 , когда две звезды σ_W (α_W, δ_W) и σ_E (α_E, δ_E) достигнут одной высоты, находят из выражения

$$s_0 = \alpha_0 + t_0,$$

где

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{1}{2} (\alpha_W + \alpha_E); & t_0 &= \frac{1}{2} (t_W + t_E) = \frac{\Delta\delta}{15} \frac{\operatorname{tg} \delta \cos \beta - \operatorname{tg} \varphi}{\sin \beta}; \\ \Delta\delta &= \frac{1}{2} (\delta_E - \delta_W); & \beta &= \frac{1}{2} (\alpha_E - \alpha_W); \end{aligned} \right\} \quad (7.64)$$

часовые углы звезд в момент s_0

$$t_W = s_0 - \alpha_W;$$

$$t_E = s_0 - \alpha_E;$$

общее зенитное расстояние z_0 находят по формуле косинуса стороны

$$\begin{aligned} \cos z_0 &= \sin \varphi \sin \delta_W + \cos \varphi \cos \delta_W \cos t_W = \\ &= \sin \varphi \sin \delta_E + \cos \varphi \cos \delta_E \cos t_E. \end{aligned} \quad (7.65)$$

Азимуты звезд вычисляются по формулам синусов

$$\left. \begin{aligned} \sin A_W &= \cos \delta_W \sin t_W \operatorname{cosec} z_0; \\ \sin A_E &= \cos \delta_E \sin t_E \operatorname{cosec} z_0. \end{aligned} \right\} \quad (7.66)$$

Найденными после решения этой задачи величинами пользоваться еще нельзя, так как наблюдать восточную и западную звезды пары в один и тот же момент практически невозможно.

Чтобы устранить указанное противоречие, достаточно наблюдать первую звезду за несколько минут до момента s_0 , а вторую — на столько же минут после него, т. е. на ином зенитном расстоянии, однако равном для обеих звезд, и в иных азимутах.

Из практики применения способа Цингера выяснилось, что для наблюдения пары звезд вблизи первого вертикала достаточно 5 мин.

Таким образом, координаты звезд z и A , вычисленные для среднего момента s_0 , достаточно исправить поправками Δz и ΔA за промежуток времени в 2,5 мин. Эти исправленные координаты и составляют окончательные эфемериды звезд пары.

Если наблюдения начинаются с восточной звезды, то новое зенитное расстояние должно быть больше вычисленного для момента s_0 , т. е.

$$z = z_0 + 2,5\Delta z,$$

а азимуты звезд в этом случае будут

$$\left. \begin{aligned} A_E &= A'_E - 2,5 \Delta A_E; \\ A_W &= A'_W + 2,5 \Delta A_W. \end{aligned} \right\} \quad (7.67)$$

Если же наблюдения начинаются с западной звезды, то зенитное расстояние и азимуты звезд пары соответственно будут

$$z = z_0 - 2,5 \Delta z;$$

$$A_W = A'_W - 2,5 \Delta A_W;$$

$$A_E = A'_E + 2,5 \Delta A_E.$$

На основании приведенных формул и составлены указанные выше «Рабочие эфемериды» пар звезд. При этом для каждой пары в эфемеридах даются данные s , z , A_W и A_E по аргументу широта φ для двух порядков наблюдений звезд: EW и WE . Пользование рабочими эфемеридами не вызывает каких-либо затруднений.

Необходимо заметить, что максимальные отклонения азимутов звезд в парах от условия симметричности (7.55) не превышают 3° . В настоящее время разработана новая теория [50], позволившая полностью автоматизировать процесс подбора и составления эфемерид равновысотных пар звезд с помощью ЭВМ.

3. Наблюдение пар Цингера

Общий порядок наблюдений для определения долготы состоит из:

приема радиосигналов времени первой радиостанции, наблюдений n пар звезд, приема радиосигналов времени второй радиостанции.

Заметим, что инструкция разрешает применять и другую технологическую схему для определения указанных величин, а именно:

наблюдение n' пар звезд, прием радиосигналов времени, наблюдение n'' пар звезд.

Отличие второй схемы от первой состоит в том, что величина хода хронометра выводится здесь не из приема радиосигналов времени, а из наблюдений двух групп пар звезд. Вторая технологическая схема имела некоторое значение в прошлом, когда качество радиоприемников было невысокое, мощность передающих радиостанций — сравнительно небольшая, а промежутки между передачами сигналов времени — значительные.

В настоящее время, когда качество и надежность работы радиоприемников существенно повысились и многие мощные радиостанции осуществляют круглосуточную подачу радиосигналов времени, надобность во второй схеме отпала. В связи с этим мы не будем останавливаться на этой программе.

Для наблюдений пар Цингера на пункте Лапласа применяется астрономический теодолит или зенит-телескоп, снабженный контактным микрометром. Подготовка теодолита к наблюдениям осуществляется точно так же, как и в способе совместного определения широты и долготы по наблюдениям n звезд в одном альмукантарате. В связи с тем что в рабочих эфемеридах азимуты звезд даны от точки Юга, ориентирование диаметра $0-180^\circ$ горизонтального круга в меридиане производится нулем на Юг.

Наблюдение звезд с помощью контактного микрометра так же, как и в способе равных высот, может производиться как при подвижном, так и при неподвижном по азимуту теодолите. Обе указанные методики наблюдений подробно описаны при изложении способа совместного определения широты и долготы из наблюдений звезд в одном альмукантарате.

Дополнительно заметим, что если при наблюдениях серий из n звезд в одном альмукантарате, выполненных для каждой звезды при неподвижном по азимуту приборе, влияние текущей коллимации полностью не исключается [см. формулу (7.12)], то при выводе величины y по формуле (7.68) из наблюдений двух звезд на одной высоте влияние текущей коллимации исключается полностью, если значения $[c_2^2]$ одинаковы для восточной и западной звезд пары: Действительно, полагая влияние всех прочих попра-

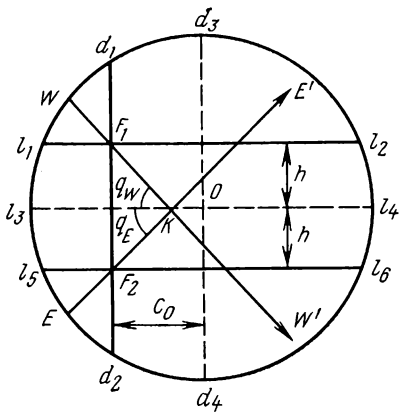


РИС. 81

исключается из наблюдений каждой звезды при условии $[c_i] = 0$, т. е. в случае симметричного расположения контактов микрометра относительно бесколлимационной плоскости. Кроме того, при выводе величины y из наблюдений двух звезд на равной высоте для исключения наклона подвижной нити достаточно произвести наблюдения так, чтобы $[c_E] = [c_W]$.

Для исключения влияния текущей коллимации и наклона подвижной нити при работе с неподвижным по азимуту прибором можно воспользоваться описанным выше позиционным устройством теодолита ДКМ-ЗА. При наблюдениях с таким позиционным устройством необходимо знать позиционные (параллактические) углы звезд пар Цингера.

В ЦНИИГАиК А. П. Колупаевым разработано специальное позиционное устройство в контактном микрометре для наблюдений пар Цингера. При наблюдениях с этим позиционным устройством не требуется знать параллактические углы звезд. Позиционное устройство Колупаева, изображенное на рис. 81, представляет собой сетку из трех координатных нитей, натянутых в фокальной плоскости.

На рис. 81 l_1l_2 и l_5l_6 — горизонтальные координатные нити, d_1d_2 — вертикальная координатная нить, EE' и WW' — следы восточной и западной звезд пары Цингера, q_E и q_W — позиционные (параллактические) углы звезд, O — центр поля зрения, лежащий в бесколлимационной плоскости трубы d_3d_4 , h — расстояние от горизонтальных координатных нитей до подвижной нити l_3l_4 , когда средний контакт микрометра находится на горизонтальной линии, проходящей через центр поля зрения O . При наблюдениях с данным позиционным устройством теодолит устанавливается по азимуту так, чтобы западная звезда пары Цингера прошла через точку пересечения вертикальной координатной нити с верхней горизонтальной нитью F_1 , а восточная звезда —

вок равным нулю, значение y на основании (7.68) и (7.12), можно представить в виде

$$y = \frac{l_E - l_W}{\sin A_W - \sin A_E} = \frac{z_{0E} - z_{0W}}{\sin A_W - \sin A_E} + \frac{\operatorname{ctg} z ([c_E^2] - [c_W^2])}{2kp'' (\sin A_W - \sin A_E)}.$$

Если $[c_W^2] = [c_E^2]$, то последний член этой формулы обращается в нуль.

Влияние наклона подвижной нити контактного микрометра на основании (7.23) исключается

через точку пересечения вертикальной координатной нити с нижней, горизонтальной нитью F_2 . При равенстве параллактических углов $q_E = q_W$ следы звезд EE' и WW' пересекутся в точке K , лежащей на линии l_3l_4 . При этом автоматически выполняются условия $[c_E] = [c_W]$ и $[c_E^2] = [c_W^2]$ и, следовательно, в выводе y исключается влияние текущей коллимации и наклона подвижной нити.

Величины h и c_0 позиционного устройства рассчитаны так, чтобы при незначительном неравенстве позиционных углов звезд в паре ($|q_E - q_W| < 3^\circ$) погрешность в y не превышала $0,03''$, что можно считать пренебрегаемо малой величиной.

Порядок наблюдения каждой пары звезд с контактным микрометром ЦНИИГАиК следующий:

за 4—5 мин до эфемеридного момента s трубу теодолита устанавливают на эфемеридное зенитное расстояние пары и закрепляют в этом положении зажимным винтом трубы, верхнюю часть теодолита в соответствии с выбранным порядком наблюдений (WE или EW) устанавливают по азимуту первой звезды, талькоттовский уровень скрепляют с трубой зажимным винтом и откидывают его ограничительную вилку, пузырек уровня элевационным винтом выводится на середину, подвижная нить микрометра устанавливается на расстоянии около 1,5 оборотов наводящего винта от нуля-пункта гребенки навстречу ожидаемому появлению в поле зрения трубы изображения звезды;

с приближением изображения звезды к первой по ходу координатной горизонтальной нити отсчитывают талькоттовский уровень, вертикальную координатную нить наводят вращением азимутального винта теодолита на звезду и удерживают на ней вращением винта до тех пор, пока изображение звезды не дойдет до горизонтальной координатной нити (точки F_1 или F_2), после этого вращение азимутального винта прекращают и дают сигнал для пуска хронографа;

с момента вступления звезды на подвижную нить контактного микрометра последнюю удерживают на звезде путем вращения обеими руками рукояток ручного привода на протяжении приблизительно трех оборотов винта микрометра, после этого отсчитывают по талькоттовскому уровню;

верхнюю часть теодолита устанавливают по азимуту второй звезды пары и наблюдают ее в таком же порядке, как и первую.

Помощник наблюдателя, работающий с хронографом, производит записи в журнале наблюдений и на ленте хронографа, по команде наблюдателя осуществляет пуск и остановку хронографа, следит за правильностью работы хронографа, производит разметку и расшифровку ленты. С целью исключения параллакса перьев (марок) у пишущих и маркопечатающих хронографов после наблюдения первой звезды пары помощник наблюдателя переключает электромагниты, чтобы перо, записывающее контакты микрометра, записывало контакты хронометра, и наоборот.

При переходе от наблюдений одной пары Цингера к другой рекомендуется менять порядок наблюдения звезд в паре. Если, например, первая пара наблюдалась в порядке WE , то следующие за ней пары наблюдаются в порядке EW , WE , EW и т. д.

В двухчасовом интервале между приемами радиосигналов времени можно легко произвести наблюдения 6—8 пар звезд Цингера. Для определения долготы пункта 1 класса рекомендуется производить наблюдения не менее шести серий по 6—8 пар звезд в каждой серии. В разные вечера рекомендуется также наблюдать разные пары звезд. При этом зенитные расстояния пар выбирают в пределах от $18\text{--}20^\circ$ до $50\text{--}55^\circ$ с азимутами западных звезд от 60° до 120° .

4. Формулы для вычисления y из наблюдений пар звезд с учетом необходимых поправок

При вычислениях «вручную» с помощью обычных вычислительных средств формулу (7.57) целесообразно раскрыть. Подставив значения коэффициентов, при соблюдении условий симметричности (7.54) и (7.55) получим

$$y_i = \frac{l_E - l_W}{\sin A_W - \sin A_E} \text{ с весом } P_{y_i} = 2\sin^2 A_W, \quad (7.68)$$

где

$$\left. \begin{aligned} l_E &= (z'_E - z_{\text{эф}}) + \Delta l_{i_E} + \Delta l_{W_E} + \Delta l_{\nu_E} + \Delta l_{a_E} + \Delta l_{p_E} + \Delta l_{\varphi_E}; \\ l_W &= (z'_W - z_{\text{эф}}) + \Delta l_{i_W} + \Delta l_{W_W} + \Delta l_{\nu_W} + \Delta l_{a_W} + \Delta l_{p_W} + \Delta l_{\varphi_W}. \end{aligned} \right\} \quad (7.68')$$

В формулах (7.68') обозначены следующие поправки свободных членов:

Δl_i — поправка за наклон оси талькоттовского уровня,

Δl_W — поправка за ускорение движения звезды по зенитному расстоянию,

Δl_{ν} — поправка за ширину контакта и мертвый ход винта микрометра,

Δl_a — поправка за влияние суточной аберрации,

Δl_p — поправка за параллакс марок (перьев),

Δl_{φ} — поправка за неверно принятую широту.

Подставив значения свободных членов в (7.68), получим

$$\begin{aligned} y &= \frac{z'_E - z'_W}{\sin A_W - \sin A_E} + \frac{1}{2 \sin A_W} [(\Delta l_{i_E} - \Delta l_{i_W}) + (\Delta l_{W_E} - \Delta l_{W_W}) + \\ &+ (\Delta l_{\nu_E} - \Delta l_{\nu_W}) + (\Delta l_{a_E} - \Delta l_{a_W}) + (\Delta l_{p_E} - \Delta l_{p_W}) + \\ &+ (\Delta l_{\varphi_E} - \Delta l_{\varphi_W})], \end{aligned} \quad (7.69)$$

где, при **соблюдении** условий симметричности (7.55), принято

$$\sin A_W - \sin A_E = 2 \sin A_{\Psi},$$

$$z_{0E, W} = \arccos \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_{E, W}) (1 + \cos t_{0E, W}) - \cos(\varphi_0 + \delta_{E, W}) (1 - \cos t_{0E, W})],$$

$$t_{0E, W} = T_{HE, W} + u_0 + \omega (T_{HE, W} - X) - \alpha_{E, W}.$$

Рассмотрим влияние каждой из перечисленных выше поправок на вычисленное значение величин y .

1. Поправка за наклон оси талькоттовского уровня на основании формул (7.69) и (7.26) будет

$$\begin{aligned} \Delta y_i &= \frac{\Delta I_{iE} - \Delta I_{iW}}{2 \sin A_W} = \frac{-i_E \frac{\tau}{2} - (-i_W \frac{\tau}{2})}{2 \sin A_W} = \\ &= (i_W - i_E)^{\partial/2} \frac{\tau}{4} \operatorname{cosec} A_W, \end{aligned} \quad (7.70)$$

где $(i_W - i_E)^{\partial/2} = (J + \Pi)_W - (J + \Pi)_E$, если нуль шкалы уровня находится вблизи объектива; $(i_W - i_E)^{\partial/2} = (J + \Pi)_E - (J + \Pi)_W$, если нуль шкалы уровня находится вдали от объектива.

В этих формулах $(J + \Pi)$ сумма отсчетов по левому и правому концам пузырька уровня, взятая как среднее из отсчетов уровня, произведенных до и после наблюдения звезды.

2. Поправка за ускорение движения звезд по зенитному расстоянию вычисляется по формуле (5.62)

$$\Delta l_W = \Delta z_W = 0,454 \frac{n+1}{n-1} \frac{d^2 z}{dt^2} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2,$$

где n — число контактов, $T_n - T_1$ — промежуток времени, выраженный в секундах, между наблюдениями на 1-м и n -м контакте,

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \cos \varphi \sin \varphi \cos A + \cos^2 \varphi \operatorname{ctg} z \cos^2 A.$$

При соблюдении условия симметричности (7.55) имеем

$$(T_n - T_1)_E = (T_n - T_1)_W = (T_n - T_1).$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \Delta y_W &= \frac{\Delta I_{WE} - \Delta I_{WW}}{2 \sin A_W} = \\ &= 0,454 \frac{n+1}{n-1} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2 \frac{\left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right)_E - \left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right)_W}{2 \sin A_W}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \frac{d^2z}{dt^2} - \frac{d^2z}{dt^2} &= (\cos \varphi \sin \varphi \cos A_E + \cos^2 \varphi \operatorname{ctg} z \cos^2 A_E) - \\ &- (\cos \varphi \sin \varphi \cos A_W + \cos^2 \varphi \operatorname{ctg} z \cos^2 A_W) = \\ &= \cos \varphi \sin \varphi (\cos A_E - \cos A_W) + \cos^2 \varphi \operatorname{ctg} z (\cos^2 A_E - \cos^2 A_W). \end{aligned}$$

При соблюдении того же условия симметричности в выборе звезд пары относительно меридиана получим:

$$\begin{aligned} \cos A_E - \cos A_W &= 0; \\ \cos^2 A_E - \cos^2 A_W &= 0. \end{aligned}$$

Таким образом, поправка величины y за ускорение движения звезд по зенитному расстоянию в способе Цингера равна нулю, т. е.

$$\Delta y_W = 0. \quad (7.71)$$

3. Поправка за ширину контакта и мертвый ход контактного микрометра вычисляется по формуле

$$\Delta y_\gamma = \frac{\Delta l_{\gamma E} - \Delta l_{\gamma W}}{2 \sin A_W} = (\mp \text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} A_W. \quad (7.72)$$

При наблюдениях с микрометром типа ЦНИИГАиК знак минус перед Шк ставится при работе хронографа на размыкание цепи, знак плюс — на замыкание цепи.

4. Поправка за влияние суточной аберрации и в зенитное расстояние светил (в свободный член уравнения поправок) вычисляется по формуле

$$\Delta l_a = \Delta z_a = -0,32'' \cos z \cos \varphi \sin A. \quad (7.73)$$

Поправка величины y за влияние суточной аберрации соответственно будет

$$\begin{aligned} \Delta y_a &= \frac{\Delta l_{aE} - \Delta l_{aW}}{\sin A_W - \sin A_E} = +0,32'' \cos z \cos \varphi \frac{\sin A_W - \sin A_E}{\sin A_W - \sin A_E} = \\ &= +0,32'' \cos z \cos \varphi. \end{aligned} \quad (7.74)$$

5. Поправка зенитного расстояния светила за параллакс перьев (марок) хронографа определяется формулой

$$\Delta l_p = \Delta z_p = 15 \Delta T_p \cos \varphi \sin A.$$

Имея в виду, что при наблюдении второй звезды пары знак перед ΔT_p меняется на обратный (переключением соленоидов хронографа), получим

$$\Delta y_p = \frac{\Delta l_{pE} - \Delta l_{pW}}{\sin A_W - \sin A_E} = 15 \Delta T_p \cos \varphi \frac{\sin A_E + \sin A_W}{\sin A_W - \sin A_E}.$$

Но так как

$$A_E = 360 - A_W,$$

то

$$\sin A_E + \sin A_W = 0$$

и, следовательно, при переключении соленоидов хронографа между звездами пары влияние параллакса исключается в выводе величины y , т. е.

$$\Delta y_p = 0. \quad (7.75)$$

6. Поправка величины y за неверно принятое при вычислениях значение широты.

При точном соблюдении условия симметричности звезд в паре (7.55) поправка

$$\Delta y_x = \frac{[bc]}{[cc]} x \quad (7.76)$$

была бы ничтожно мала даже при больших значениях x . Однако условие симметричности в парах Цингера точно не соблюдается. Максимальная сумма азимутов восточной и западной звезд составляет

$$A_E + A_W = 2\pi \pm 3^\circ.$$

Из выражения (7.76) определим то значение поправки $x = \Delta\varphi$, при котором его влиянием на вывод величины y можно пренебречь.

После простых преобразований выражения (7.76) получим

$$\Delta y_x = \frac{\cos A_E - \cos A_W}{\sin A_W - \sin A_E} x = \operatorname{tg} \frac{A_W + A_E}{2} x. \quad (7.77)$$

Полагая $|A_W + A_E| \approx 3^\circ$; $|\Delta y_x| < 0,05''$, будем иметь $|x| \leq 2''$.

Для получения широты пункта с погрешностью $2''$ достаточно произвести определение широты из одной-двух пар Талькотта или одним из приближенных способов, например, по измеренному зенитному расстоянию Полярной звезды. Нужно также иметь в виду, что величина и знак суммы $A_W + A_E$ — величины случайные. Поэтому в среднем выводе величины y из наблюдений n пар звезд влияние погрешности за неверно принятое значение широты будет значительно ослаблено.

Таким образом, формула для вычисления y из наблюдений пары звезд с учетом необходимых поправок имеет вид

$$y_i = \frac{z'_{0E} - z'_{0W}}{\sin A_W - \sin A_E} + \Delta y_i + \Delta y_a + \Delta y_\gamma, \quad P_{y_i} = 2 \sin^2 A_W. \quad (7.78)$$

5. Обработка наблюдений

Обработка наблюдений в способе Цингера состоит из: обработки приема радиосигналов времени, расшифровки хронографической ленты и обработки журнала наблюдений,

вычислений значений y из наблюдений пар звезд, вывода среднего весового значения y_{cp} и долготы пункта по наблюдениям серии из n пар звезд,

вывода окончательного значения долготы пункта и оценки точности конечного результата.

Обработка приема радиосигналов времени и расшифровка хронографической ленты производятся точно так же, как в способе совместного определения широты и долготы из наблюдений n звезд в одном альмукантарате.

Обработка журнала наблюдений пар звезд выполняется в следующем порядке:

подсчитываются средние моменты наблюдений T_H для каждой звезды пары,

вычисляются средние значения сумм отсчетов по талькоттовскому уровню,

вычисляются поправки Δy_i , Δy_a , Δy_v и подсчитывается их сумма для каждой пары звезд.

Приведем образец обработки приемов радиосигналов времени.

Выписка из журнала наблюдений пары звезд приведена в табл. 43, а вычисление значений y из наблюдений пар звезд по формуле (7.78) — в табл. 44.

Вычисление величины y_{cp} и долготы пункта λ' из наблюдений одной серии пар звезд, а также оценку точности производят по формулам (7.58)—(7.63). Пример этих вычислений приведен в табл. 45.

Поправка долготы за влияние короткопериодических членов нутации. Уравненное значение долготы из наблюдений n пар звезд в серии исправляется поправкой за влияние короткопериодических членов нутации по формуле (5.79):

$$\delta\lambda'_{кп} = f' + \frac{1}{15} g' \operatorname{tg} \varphi \sin(G' + s_{cp}),$$

где величину f' выбирают на момент 0^h эфемеридного времени, а величины g' и G' интерполируют на момент s_{cp} . Для нахождения интерполяционного множителя удобно принять средний момент приема радиосигналов времени (по всемирному времени). Тогда интерполяционный множитель с точностью до 0,05 выбирается по аргументу $\frac{1}{2}(UTI' + UTI'')$ из табл. 20 АТ.

Величину $P_{cp} = \frac{1}{15} \operatorname{tg} \varphi \sin(G' + s_{cp})$ выбирают из таблицы 34 АТ по аргументам φ и $(G' + s_{cp})$. При этом величине P_{cp} припи-

Обработка результатов приемов радиосигналов времени

2 июля 1973 г.

1 прием $U_1 = -3^h 15^m 45,124^s$ в момент $X_1 = 16^h 01^m 30,205^s$ 2 прием $U_2 = -3 15 45,332$ в момент $X_2 = 18 01 50,125$ $U_{cp} = -3 15 45,228$ в момент $X_{cp} = 17 01 40,165$ $\lambda_0 = +3 16 34,500$ $u_0 = +49,272^s$ в момент $X_{cp} = 17^h 01^m 40^s$

$$\omega^h = \frac{U_2 - U_1}{(X_2 - X_1)} = -0,104^s.$$

2/3 июля 1973 г.

Пункт *Ивановка*

Теодолит У5 № 1227

Хронометр № 387

 $\tau = 2,66''$ Наблюдатель *А. П. Герасимов* $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$ $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,5^s$

Пара № 830 EW

 $s = 15^h 57,7^m$ $z = 28^\circ 25'$

$$(-Шк - Мх) \frac{R}{2} = +0,30''$$

$A_E = 275^\circ 43'$	$A_W = 87^\circ 28'$ cosec $A_W = 1,001$ cos $\varphi_0 = 0,707$
16,8—33,5 50,3	19,0—35,2 54,2
16,8—33,5 50,3	19,0—35,2 54,2
$i_E = 50,30$	$i_W = 54,20$
	$i_W - i_E = +3,90 \frac{\partial}{2}$
15 ^h 54 ^m 16,91 ^s	15 ^h 59 ^m 21,72 ^s
18,22	22,87
19,86	24,06
21,19	25,57
22,06	26,92
23,80	28,05
24,96	29,33
26,24	30,68
27,58	31,95
15 ^h 54 ^m 22,38 ^s	15 ^h 59 ^m 26,79 ^s

$$\Delta y_i = (i_W - i_E) \frac{\tau}{4} \operatorname{cosec} A_W = +2,60''$$

$$\Delta y_a = +0,32'' \cos z \cos \varphi_0 = +0,20''$$

$$\Delta y_{\varphi} = (-Шк - Мх) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} A_W = +0,30''$$

$$\Sigma = +3,10''$$

Вычисление значений y

2/3 июля 1973 г.

Наблюдатель А. П. Герасимов Теодолит У5 № 1217

Хронометр № 387

Действия	Номер пары	
	830 EW	
	Номер звезды	
	445E	330 W
T_H	15 ^h 54 ^m 22,38 ^s	15 ^h 59 ^m 26,79 ^s
u_0	+49,27	+49,27
$\omega (T_H - X)$	+0,02	+0,01
s	15 55 11,67	16 00 16,07
α	18 18 40,04	13 33 15,09
t_0^h	2 23 28,37	2 27 00,98
t_0^m	35° 52' 05,55"	36° 45' 14,70"
φ_0	44 58 40,00	44 58 40,00
δ	+36 02 52,55	37 21 49,15
$\varphi_0 - \delta$	8 55 47,45	7 36 50,85
$\varphi_0 + \delta$	81 01 32,55	82 20 29,15
$\cos(\varphi_0 - \delta)$	0,987879	0,991182
$1 + \cos t_0$	1,810367	1,801211
$\cos(\varphi_0 + \delta)$	0,155991	0,133269
$1 - \cos t_0$	0,189633	0,198789
$\cos z_0'$	0,879421	0,879418
z_0'	28° 25' 38,7"	28° 25' 40,0"
$z_0'_E - z_0'_W$		-1,30"
$\sin A_W - \sin A_E$		1,994
y'		-0,65"
$\sum y$		+3,10"
		+2,45"

Т а б л и ц а 45

Вычисление долготы пункта из наблюдений серии пар звезд

Оценка точности

2/3 июля 1973 г.

Наблюдатель Герасимов А. П.

Теодолит У5 № 1217

Хронометр № 387

Номер пары	y	$P_y = 2 \sin^2 A$	v	v^2
824	+1,90"	2,00	-0,11"	0,012
827/321	+1,70	1,99	+0,09	0,008
830	+2,45	1,98	-0,66	0,436
835	+2,10	1,99	-0,31	0,096
837	+1,45	1,99	+0,34	0,116
841/338	+0,90	1,91	+0,89	0,792
844/341	-2,00	1,74	-0,21	0,044

$$y_{cp} = \frac{[y_i P_y]}{[P_y]} = +1,79'', \quad [P_y] = 13,60, \quad [P_y^2] = 2,914$$

$$\lambda'_3 = \lambda_0 + \frac{1}{15} y_{cp} \sec \varphi = 3^h 16^m 34,500^s + 0,169^s = 3^h 16^m 34,669^s$$

$$\mu = \sqrt{\frac{2,914}{6}} = 0,69''$$

$$m_{y_{cp}} = \frac{\mu}{\sqrt{[P_y]}} = \frac{0,69''}{\sqrt{13,6}} = 0,19''$$

$$m_{\lambda'} = \frac{1}{15} m_{y_{cp}} \sec \varphi = 0,018^s.$$

Т а б л и ц а 46

Вычисление поправки в долготу за влияние короткопериодических членов нутации
 $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40''$

Действия	3-я долгота	Действия	3-я долгота
Дата	2/3—VII—1973 г.	$G' + s_{cp}$	14,7
$\frac{1}{2} (UT1' + UT1'')$	19 ^h 4 ^m	P_{cp}	-0,04
$\frac{1}{48} (UT1' + UT1'')$	0,79 ^d	g'	0,115''
s_{cp}	16,0 ^h	f	+0,017 ^s
G'	22,7	$P_{cp} g'$	-0,005
		$\partial \lambda_{кп}$	+0,012 ^s

сывают знак плюс, если аргумент ($G' + s_{cp}$) лежит в пределах от 0 до 12^h и знак минус, если он находится в пределах от 12 до 24^h.

Пример вычисления поправки в долготу за влияние короткопериодических членов нутации приведен в табл. 46.

Долгота, исправленная поправкой за влияние короткопериодических членов нутации, равна

$$\lambda_3 = \lambda'_3 + \partial \lambda_{nut_3} = 2^h 16^m 34,669^s + 0,012^s = 2^h 16^m 34,681^s.$$

6. Вывод окончательного значения долготы пункта.

Оценка точности

Долгота пункта, выведенная из наблюдений n серий пар звезд Цингера вычисляется по формуле

$$\lambda' = \frac{\sum P_{\lambda_i} \lambda_i}{[P_{\lambda_i}]}, \quad (7.79)$$

где λ_i — значения долгот из отдельных серий, $P_{\lambda_i} = [P_y]_i \cos^2 \varphi$ — вес долготы каждой серии.

Средняя квадратическая погрешность долготы пункта по внутренней сходимости результатов отдельных серий вычисляется по формуле

$$M_{\lambda'} = \frac{\mu_{\lambda'}}{\sqrt{[P_{\lambda'}]}}, \quad (7.80)$$

где

$$\mu_{\lambda'} = \sqrt{\frac{[P_{\lambda'} v_x^2]}{n-1}}; \quad (7.81)$$

$v_{\lambda'}$ — уклонения отдельных значений долготы от среднего весового.

Средняя квадратическая погрешность $M_{\lambda'}$ не должна превышать $0,022^s$. Окончательное значение долготы с учетом поправки за лично-инструментальную разность вычисляется по формуле

$$\lambda = \lambda' + \partial\lambda. \quad (7.82)$$

При вычислении окончательного значения лично-инструментальной разности используются результаты обоих ее определений на основном пункте. При этом величина $\partial\lambda$ подсчитывается по формуле

$$\partial\lambda = \frac{[P_{\Delta\lambda_i} \Delta\lambda_i]}{[P_{\Delta\lambda_i}]}, \quad (7.83)$$

где $\Delta\lambda_i$ — значение личной разности, полученное из каждой серии звезд; $P_{\Delta\lambda_i}$ — вес значения $\Delta\lambda_i$, равный $[P_y]_i \cos^2 \varphi_{\text{осн}}$.

Средняя квадратическая погрешность окончательного значения лично-инструментальной разности вычисляется по формуле

$$M_{\partial\lambda} = \sqrt{\frac{[P_{\Delta\lambda} v_{\Delta\lambda}^2]}{(r-1) [P_{\Delta\lambda}]}}; \quad (7.84)$$

где r — число наблюдаемых серий звезд в обоих определениях личной разности; $v_{\Delta\lambda}$ — уклонение отдельных результатов определения лично-инструментальной разности от ее среднего весового значения.

Средняя квадратическая погрешность $M_{\Delta\lambda}$ не должна превышать $0,012^s$.

Средняя квадратическая погрешность окончательного вывода долготы вычисляется по формуле

$$M_{\lambda} = \sqrt{M_{\lambda'}^2 + M_{\partial\lambda}^2 + M_{\delta\lambda}^2}, \quad (7.85)$$

где $M_{\delta\lambda} = 0,016^s$ — величина среднего квадратического колебания поправки за лично-инструментальную разность, выведенная из статистических исследований производственных определений астрономическим теодолитом с контактным микрометром.

Дата	Номер серии	Число пар	Долгота от Гринвича	Вес $P_{\lambda'} =$ $= [P_{\rho}] \cos^2 \varphi$	$v_{\lambda'}$	$v_{\lambda'}^2$
1973 г.						
Июль 1/I	1	8	$3^h 16^m 34,653^s$	7,7	+0,005 ^s	0,000025
1/II	2	9	,657	8,7	+0,001	0,000001
2/III	3	7	,669	6,8	-0,011	0,000121
4/IV	4	6	,628	5,9	+0,130	0,000900
4/V	5	7	,637	6,6	+0,022	0,000484
7/VIII	6	9	,693	8,6	-0,035	0,001225
			$\lambda' = 3^h 16^m 34,658^s$	$[P_{\lambda'}] =$	$[P_{\lambda'} v_{\lambda'}] =$	$[P_{\lambda'} v_{\lambda'}^2] =$
			$\partial \lambda = +0,022$	$= 44,3$	$= -0,010$	$= 0,020063$
			$\lambda = 3^h 16^m 34,680^s$			

$$\mu_{\lambda'} = \sqrt{\frac{[P_{\lambda'} v_{\lambda'}^2]}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,020063}{5}} = 0,063^s;$$

$$\mu_{\lambda'} = \frac{\mu_{\lambda'}}{\sqrt{[P_{\lambda'}]}} = \frac{0,063}{\sqrt{44,3}} = 0,010^s;$$

$$\partial \lambda = +0,022^s \quad M_{\partial \lambda} = 0,009^s;$$

$$M_{\lambda} = \sqrt{(0,010)^2 + (0,009)^2 + (0,016)^2} = 0,021^s.$$

В окончательный результат определения долготы вводятся поправки за приведение к центру геодезического знака и к среднему полюсу.

Вычисление долготы пункта Ивановка приведено в табл. 47.

§ 50. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ПАР ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ. СПОСОБ ПЕВЦОВА

1. Теоретические основания способа

Способ определения широты из наблюдений пар звезд на равных высотах, как и способ Цингера, является частным случаем способа совместного определения φ и λ из наблюдений n звезд в одном альмукантарате.

Принципиальное отличие способа определения широты от способа определения долготы из наблюдений двух звезд на равной высоте состоит только в выборе этих звезд по азимутам. Если

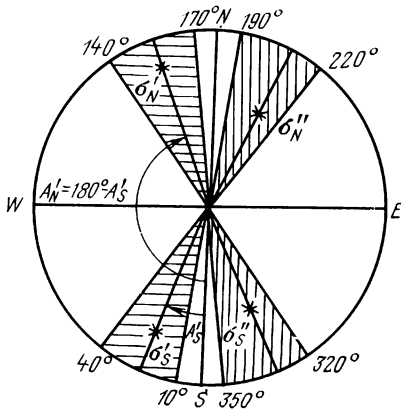


РИС. 82

перемещаются параллельно плоскости горизонта, вследствие чего наблюдать прохождения звезд через горизонтальные нити сетки невозможно. Кроме того, в течение короткого промежутка времени нельзя подобрать пары звезд в меридиане с равными зенитными расстояниями. Поэтому на практике звезды в каждой паре выбирают вблизи меридиана, на угловых удалениях от него от 10 до 40°. При этом для обеспечения наибольшего возможного веса P_x в соответствии с формулой (5.40) выбор звезд в паре осуществляется при соблюдении условий

$$[ab] = [\cos A] = 0; \quad [bc] = [\sin A \cos A] = 0, \quad (7.86)$$

которые представляют собой условия симметричного расположения звезд пары относительно плоскости первого вертикала. В функции азимутов звезд пары условия симметричности относительно первого вертикала имеют вид

$$A_S = 180^\circ - A_N, \quad A'_S = 540^\circ - A_N. \quad (7.87)$$

Графическое изображение условий симметричности выбора звезд в парах относительно первого вертикала показано на рис. 82. При соблюдении условий симметричности (7.86) и (7.87) численное значение веса P_x для каждой пары звезд определится формулой

$$P_x = [\cos^2 A] = 2 \cos^2 A_N. \quad (7.88)$$

В зависимости от азимутов звезд пары веса P_x представлены в табл. 48.

Значение x для каждой пары звезд, на основании двух уравнений вида (7.5), при соблюдении условий симметричности (7.87) будет

$$x_i = - \frac{[bi]}{[bb]}, \quad \text{с весом } P_{x_i} = 2 \cos^2 A_N. \quad (7.89)$$

в способе определения долгот выбор звезд в паре производится под условием $P_y = \max$, то в способе определения широты выбор звезд в паре производится под условием $P_x = \max$.

Для достижения этого условия в соответствии с формулой веса (5.40) звезды в каждой паре необходимо наблюдать в меридиане, по обе стороны от зенита. В этом случае

$$P_{x_{\max}} = [\cos^2 A] = 2.$$

Однако в видимом суточном движении звезды в меридиане

A_N	10° 350°	20° 340°	30° 330°	40° 320°
P_x	1,94	1,77	1,50	1,18

Уравненное значение x из наблюдений n пар звезд будет

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum x_i P_{x_i}}{\sum P_{x_i}} \text{ с весом } P_{x_{\text{ср}}} = [P_{x_i}]. \quad (7.90)$$

Уравненное значение широты пункта будет

$$\varphi' = \varphi_0 + x_{\text{ср}} \text{ с весом } P_{\varphi} = P_{x_{\text{ср}}}. \quad (7.91)$$

Полученное значение широты приводится к центру пункта и к среднему полюсу. Если видимые места звезд не исправлялись поправками за влияние короткопериодических членов нутации, то значения широты, полученные в данный вечер, исправляются этими поправками по формуле (5.78).

Оценка точности производится по следующим формулам: средняя квадратическая погрешность единицы веса

$$\mu_x = \sqrt{\frac{[P_{x_i} v_{x_i}^2]}{n-1}}, \quad (7.92)$$

где $v_{x_i} = x_{\text{ср}} - x_i$; n — число пар звезд, принятых в обработку; средняя квадратическая погрешность уравненного значения широты

$$M_{\varphi} = M_{x_{\text{ср}}} = \frac{\mu_x}{\sqrt{[P_{x_i}]}}. \quad (7.93)$$

В способе определения широты из наблюдений пар звезд на равных высотах, как и в способе определения долготы (времени), исключаются погрешности, связанные с рефракцией, гнутием трубы и другими систематическими погрешностями, влияющими на результат определения в функции зенитных расстояний светил. Поэтому он является одним из самых точных способов определения широты. К недостаткам способа следует отнести увеличение времени наблюдения каждой звезды и пары в целом до 15^м. Это объясняется условиями наблюдений прохождений звезд вблизи меридиана. Кроме того, при наблюдениях прохождений звезд (особенно южных) под острым углом к горизонтальным нитям приходится значительно смещать верхнюю часть теодолита по азимуту, что не может не отразиться на точности определения наклона оси талькоттовского уровня.

Однако влияние указанных недостатков можно значительно ослабить, если в комплекте теодолита иметь окулярный микро-

метр с сеткой нитей, расстояния между которыми уменьшены до 50—60" вместо обычных 90—100".

В главе 5 отмечалось, что средняя квадратическая погрешность определения широты по одной паре звезд с помощью теодолита АУ 2"/10" составляет $m_x = 0,8''$.

Для определения широты пунктов 1 и 2 классов ($m_\phi = 0,3''$) инструкция рекомендует (с достаточным запасом прочности) производить наблюдения 12—15 пар звезд. При этом ожидаемая погрешность окончательного вывода широты будет

$$M_\phi = 0,22''.$$

Вес окончательного вывода широты составит

$$P_\phi = [P_{x_i}] = 25.$$

Способ определения широты из наблюдений пар звезд на равных высотах был известен давно. Идея этого способа принадлежит известному французскому геодезисту и астроному Мопертью (1740 г.). Однако практическая разработка способа стала возможной лишь во второй половине XIX века, после создания зенит-телескопа, астрономического теодолита и качественных уровней, скрепляемых с трубой.

В России первый опыт применения этого способа в 1870 г. принадлежал проф. Федоренко, который, однако, наблюдал пары в невыгодных условиях.

Первое обстоятельное исследование способа в теоретическом и практическом отношении сделано русским военным геодезистом М. В. Певцовым в статье «Об определении географической широты по соответственным высотам двух звезд», опубликованной в 1887 г. Им же впервые были составлены списки пар звезд для широт от $+35^\circ$ до $+65^\circ$ и вспомогательные таблицы, облегчающие вычисление эфемерид пар. Поэтому данный способ заслуженно называется способом Певцова.

По вопросу составления эфемерид большой вклад внесен русскими астрономами Витрамом, А. Орловым и военным геодезистом И. Селиверстовым. Последний составил и издал в 1912 г. «Эфемериды звезд для определения широт по соответственным высотам», в четырех выпусках с координатами звезд для эпохи 1920.0 для широт от $+40^\circ$ до $+60^\circ$. К 1940 г. эти эфемериды устарели, в связи с чем в ЦНИИГАиК под руководством проф. Цветкова были составлены новые эфемериды в пяти книгах для широт от $+40^\circ$ до $+65^\circ$. Координаты звезд в этих эфемеридах взяты для эпохи 1960.0. Работа по составлению этих эфемерид закончена в 1947 г. Эфемериды звезд помещены в Трудах ЦНИИГАиК, вып. 50 для зоны от $+54^\circ 45'$ до $+59^\circ 45'$, М., 1946; вып. 49 для зоны от $+49^\circ 45'$ до $+54^\circ 45'$, М., 1947; вып. 60 для зоны от $+39^\circ 45'$ до $+44^\circ 45'$, М., 1948; вып. 63 для зоны от $+44^\circ 45'$ до $+49^\circ 45'$, М., 1949; вып. 67 для зоны от $+59^\circ 45'$ до $+64^\circ 45'$, М., 1949.

Кроме того, в 1949 г. изданы эфемериды для определения широт по способу Певцова для зоны от $+64^{\circ} 45'$ до $77^{\circ} 45'$ (Главсевморпуть, Л., 1949) с координатами звезд на эпоху 1965.0.

По вопросу вычислений широты по способу Певцова имеется также ряд работ русских и советских геодезистов. Среди них следует отметить работы Щеткина, Орлова, Каврайского, Урмаева, Шапошникова и Молоденского.

2. Составление рабочих эфемерид

Для составления рабочих эфемерид необходимо вычислить моменты звездного времени s_S и s_N прохождений звезд через их общий альмукантарат, зенитное расстояние z и азимуты A_S и A_N . Выбрав звездную пару, которая может наблюдаться по способу Певцова, решают задачу сферической астрономии: вычисляют зенитное расстояние и азимуты на моменты, в которые две звезды достигнут одинаковой высоты, находясь по одну сторону от меридиана и в одинаковых от него удалениях.

Для решения этой задачи пользуются формулой косинуса стороны, применяя ее к стороне $90^{\circ} - \delta$ параллактического треугольника. Имея в виду необходимость соблюдения условия симметричности

$$A_N = 180^{\circ} - A_S,$$

получим, соответственно

$$\left. \begin{aligned} \sin \delta_S &= \sin \varphi_0 \cos z - \cos \varphi_0 \sin z \cos A_S; \\ \sin \delta_N &= \sin \varphi_0 \cos z + \cos \varphi_0 \sin z \cos A_S. \end{aligned} \right\} \quad (7.94)$$

Сложив уравнения (7.94), найдем зенитное расстояние пары по формуле

$$\cos z = \frac{\sin \delta_N + \sin \delta_S}{2 \sin \varphi_0}. \quad (7.95)$$

Если ввести полусумму и полуразность склонений

$$\delta = \frac{1}{2}(\delta_N + \delta_S) \text{ и } \Delta\delta = \frac{1}{2}(\delta_N - \delta_S),$$

то, на основании (7.95), получим контрольную формулу

$$\cos z = \frac{\sin \delta \cos \Delta\delta}{\sin \varphi_0}. \quad (7.96)$$

Образовав разность уравнений (7.94), найдем азимут A_S по формуле

$$\cos A_S = \frac{\sin \delta_N - \sin \delta_S}{2 \sin z \cos \varphi_0} \quad (7.97)$$

или в функции δ и $\Delta\delta$ получим

$$\cos A_S = \frac{\cos \delta \sin \Delta\delta}{\sin z \cos \varphi_0}. \quad (7.98)$$

Пункт *Ивановка* $\varphi = 59^\circ 15'$ $f = 5'$ Период наблюдений от $s = 17,5^h$
до $s = 19,5^h$

Номер пары	Номер по АЕ	m	s	z	A	$2\delta s$
253	S — 406	3,6	$17^h 37,1^m$	$22^\circ 01,2'$	$29^\circ 10'$	$5,2^m$
	N — 360	2,2	45,2		150 26	
266	S — 417	3,4	18 16,5	24 30,5	30 49	5,0
	N — 360	2,2	23,3		148,39	
271	S — 416	3,2	18 41,6	37 30,1	33 32	4,6
	N — 310	3,9	51,0		145 58	
272	S — 367	3,1	19 03,0	25 00,8	142 53	4,4
	N — 433	4,0	09,7		36 39	

Часовые углы звезд, на основании теоремы синусов, будут

$$\sin t_S = \frac{\sin z \sin A_S}{\cos \delta_S}; \quad \sin t_N = \frac{\sin z \sin A_S}{\cos \delta_N}. \quad (7.99)$$

Моменты s_S и s_N вычисляются по формулам

$$\left. \begin{aligned} s_S &= \alpha_S + t_S; \\ s_N &= \alpha_N + t_N, \end{aligned} \right\} \quad (7.100)$$

где знаки перед t_S и t_N соответствуют знакам $\sin A_S$, т. е. для звезд на западе они будут положительны, а для звезд на востоке — отрицательны.

В эфемеридах время s и зенитное расстояние z представляют данные для наблюдений звезд на средней горизонтальной нити, величина же A дает значение азимута для такой установки прибора, при которой звезда появится вне сетки нитей при условии, что крайняя нить отстоит от средней на дугу f менее $10'$. Кроме азимутов звезд в эфемеридах даются величины δA , которые представляют собой изменение азимута за промежуток времени δs , в который звезда проходит дугу f по высоте, равную $10'$. Если сложить значения A и δA , то получится азимут для такой установки теодолита, при которой прохождение звезды произойдет в момент s на средней нити.

В табл. 49 приводится величина $2\delta s$, с которой можно получить промежуток времени, необходимый для проведения наблюдения второй звезды после прохождения первой звезды пары через среднюю нить. В эфемеридах рядом с величинами s , z и A даются соответственно значения $\frac{\Delta s}{\Delta \varphi}$, $\frac{\Delta z}{\Delta \varphi}$ и $\frac{\Delta A}{\Delta \varphi}$ при изменении широты на $1'$.

Пользуясь этими значениями, можно производить интерполирование s , z и A на широту пункта наблюдения с помощью логарифмической линейки. Кроме s , z и A и их изменений, для каждой

пары даются пределы годности, указан порядок наблюдения звезд в паре (SN или NS), номера звезд по АЕ и блеск (величина) звезд.

Перед наблюдениями целесообразно на основании данных эфемерид составить рабочие эфемериды для наблюдений с интерполированными значениями z , s , A и $2\delta s$.

В соответствии с требованиями инструкции при выборе из «Эфемерид» пар звезд соблюдают следующие условия:

зенитное расстояние пары должно быть в пределах $15\text{--}50^\circ$; в широтах $60\text{--}70^\circ$ в целях выбора для наблюдений более ярких звезд можно наблюдать пары до 60° ;

удаления звезд от меридиана по азимуту должны быть в пределах $10\text{--}40^\circ$;

промежуток времени между наблюдениями звезд пары должен быть не более 15^m и не менее $2\delta s$.

Если для наблюдений по способу Певцова используют теодолит со сближенными горизонтальными нитями, то в величины A и δs , выбираемые из эфемерид для $f = 10'$, вводят поправки, вычисляемые по формулам

$$A = A' + \delta A \left(1 - \frac{f'}{10}\right);$$

$$\delta s' = \delta s \left(1 - \frac{f}{10}\right),$$

где f' — новое расстояние от средней нити.

Пример составления рабочих эфемерид пар Певцова приведен в табл. 49.

В настоящее время разработана методика подбора и составления эфемерид пар Певцова на ЭВМ [73].

3. Наблюдения

Общий порядок наблюдений состоит из:

приема радиосигналов времени первой радиостанции,

наблюдений n пар звезд,

приема радиосигналов времени второй радиостанции.

Прием радиосигналов времени необходим для вывода поправки хронометра, которая вычисляется относительно местного звездного времени с известной долготой пункта, а также для вывода часового хода хронометра, с помощью которого поправка хронометра передается на моменты наблюдений звезд. Приведенную поправку хронометра достаточно знать с точностью до $0,1^s$.

Поэтому прием радиосигналов времени можно производить с интервалом в четыре часа.

Лично-инструментальное уравнение наблюдателя не оказывает влияния на вывод величины x , если звезды в парах располагаются симметрично относительно первого вертикала. Поэтому наблюдение звезд в способе Певцова можно производить методом «глаз—ухо». Но это, конечно, не исключает возможности применения для наблюдений и контактного микрометра. При этом порядок наблюдений звезд будет такой же, как и близмеридианных звезд в способе равных высот.

Подготовка теодолита к наблюдениям ничем не отличается от подготовки в способе равных высот или в способе Цингера. Так как в эфемеридах азимуты звезд даны от точки Юга, то ориентирование диаметра $0—180^\circ$ горизонтального круга в меридиане производится нулем на Юг.

Порядок наблюдения пары звезд следующий.

1. Устанавливают трубу теодолита на зенитное расстояние пары; с трубой скрепляют талькоттовский уровень и откидывают его ограничительную вилку; пузырек уровня элевационным винтом выводится на середину; верхнюю часть теодолита устанавливают в вертикале, соответствующем азимуту первой звезды; в отличие от способа Цингера, звезды в парах Певцова можно наблюдать только в том порядке, который указан в эфемеридах. Так как в эфемеридах дано время s для положения звезды на средней горизонтальной нити, то поэтому установку теодолита для наблюдений каждой звезды следует заканчивать за 2,5—3 мин до момента s .

2. При появлении изображения звезды в поле зрения трубы отсчитывают по талькоттовскому уровню; наводящим винтом алидады устанавливают теодолит так, чтобы изображение звезды было вблизи средней вертикальной нити (или вблизи биссектора окулярного микрометра, установленного в нуль-пункте гребенки).

3. При подходе изображения звезды к первой по ходу горизонтальной нити наблюдатель берет счет секундных ударов хронометра и наблюдает прохождение звезды через горизонтальные нити методом «глаз—ухо», удерживая вращением наводящего винта изображение звезды вблизи средней вертикальной нити. Так как смещение теодолита по азимуту при наблюдениях звезд вблизи меридиана сравнительно большое (особенно южных), то следует возможно чаще отсчитывать талькоттовский уровень. Промежуток времени между прохождениями звезды через соседние нити вполне позволяет это сделать.

4. После наблюдения первой звезды верхняя часть теодолита устанавливается по азимуту второй звезды и выполняется ее наблюдение в таком же порядке, как и первой.

Пример записи наблюдений в журнале и данные, необходимые для вычисления x , приведены в табл. 50.

Астрономический пункт Сидоровка

$$\varphi_0 = 55^\circ 45' 30,0''$$

Наблюдатель *А. П. Колупаев*

Дата 18/19—IV 1958 г.

Теодолит АУ 2"/10" № 1302 $\tau = 2,304''$ $(i_S - i_N)^{d/2} = \pm [(Л + П)_S - (Л + П)_N]$. Нуль шкалы вблизи объектива. Знак плюс для КЛ, минус — для КП.

$$u_0 = +52,98^s \quad \chi = 17^h 23^m \quad \omega = +0,135^s$$

Пара № 231 (КЛ)

$$\begin{array}{l}
 N - 266, \quad S - 378 \quad z = 44^\circ 29,2' \quad 2\delta_S = 4,2 \\
 s_N = 17^h 01,6^m \quad A'_N = 144^\circ 37' \quad \delta A_N = +10' \quad \left\{ \begin{array}{l} A_N = 144^d 47' \\ A_S = 35^\circ 13' \end{array} \right\} \text{ — для средней нити} \\
 s_S = 17^h 23,6^m \quad A'_S = 34^\circ 33' \quad \delta A_S = +40' \\
 \sin 2\varphi_0 = 0,980, \quad \sec A_S = 1,224, \quad \frac{\tau}{4} \sec A_S = 0,705'', \quad k_v = 0,227 \frac{n+1}{n-1} \sin 2\varphi_0 = 0,296
 \end{array}$$

Номер нити	N — 266			S — 378			$i_S - i_N$
	T	уровень	Л + П	T	уровень	Л + П	
1	16 ^h 59 ^m 31,1 ^s	14,0—34,1	48,1	17 ^h 21 ^m 45,0 ^s	15,1—35,5	51,0	
2	51,1			22 05,3			
3	17 0 10,3			24,0	15,4—35,5	50,9	
4	28,5	14,2—34,2	48,4	42,5			
5	48,3			23 01,5	15,2—35,2	50,4	
6	01 06,0			19,7	15,0—35,1	50,1	
7	25,2	14,5—34,6	49,1	39,0	15,0—35,2	50,2	
Среднее	17 ^h 00 ^m 28,64 ^s	14,23—34,30	48,53	17 ^h 22 ^m 42,43 ^s	15,22—35,30	50,52	+1,99

$$\begin{aligned}
 T_n - T_1 &= 114,0^s \\
 \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2 &= 1,30
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta x_i &= +1,40'' \\
 \Delta x_v &= -0,39'' \\
 \Sigma &= +1,01''
 \end{aligned}$$

4. Формулы для вычисления широты с учетом необходимых поправок

Для вычислений с помощью обычных вычислительных средств формулу (7.89), при соблюдении условий (7.87), целесообразно представить в виде

$$x_i = - \frac{[bl]}{[bb]} = \frac{l_N - l_S}{\cos A_S - \cos A_N} \text{ с весом } P_{x_i} = 2 \cos^2 A_N, \quad (7.101)$$

где

$$\left. \begin{aligned} l_N &= (z'_{0N} - z_{\Phi}) + \Delta l_{i_N} + \Delta l_{v_N} + \Delta l_{a_N}; \\ l_S &= (z'_{0S} - z_{\Phi}) + \Delta l_{i_S} + \Delta l_{v_S} + \Delta l_{a_S}. \end{aligned} \right\} \quad (7.102)$$

В формулах (7.102) Δl_i , Δl_v , Δl_a — соответственно поправки свободных членов уравнений поправок за наклон оси талькоттовского уровня, за ускорение движения звезды по зенитному расстоянию, за влияние суточной аберрации.

Если наблюдения звезд производятся с помощью контактного микрометра с записью моментов прохождений на хронограф, то дополнительно к указанным появятся поправки Δl_γ — за ширину контакта и мертвый ход; Δl_p — за параллакс перьев (марок) хронографа. Однако наблюдения пар Певцова с контактным микрометром производятся крайне редко.

Подставив значения свободных членов из (7.102) в (7.101), получим

$$\begin{aligned} x &= \frac{(z'_{0N} - z_{0S})}{\cos A_S - \cos A_N} + \frac{1}{\cos A_S - \cos A_N} \times \\ &\times [(\Delta l_{i_N} - \Delta l_{i_S}) + (\Delta l_{v_N} - \Delta l_{v_S}) + (\Delta l_{a_N} - \Delta l_{a_S}) + \\ &- (\Delta l_{y_N} - \Delta l_{y_S})]. \end{aligned} \quad (7.103)$$

Значения z'_{0N} и z'_{0S} вычисляются по общей для всех зенитных способов формуле

$$\begin{aligned} z'_{0N, S} &= \arccos \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_{N, S}) (1 + \cos t_{0N, S}) - \\ &- \cos(\varphi_0 - \delta_{N, S}) (1 - \cos t_{0N, S})], \end{aligned}$$

где

$$t_{0N, S} = T_{H_{N, S}} + u_0 + \omega (T_{H_{N, S}} - X_0) - \alpha_{N, S}.$$

Влияние каждой из перечисленных выше поправок свободных членов на величину x рассмотрим отдельно.

1. Поправка за разность наклонов оси талькоттовского уровня, на основании (7.103), будет

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \frac{\Delta l_{i_N} - \Delta l_{i_S}}{\cos A_S - \cos A_N} = \frac{-i_N \frac{\tau}{2} - \left(-i_S \frac{\tau}{2}\right)}{2 \cos A_S} = \\ &= (i_S - i_N)^{\theta/2} \frac{\tau}{4} \sec A_S, \end{aligned} \quad (7.104)$$

где

$$(i_S - i_N)^{\theta/2} = \pm [(\mathcal{L} + \mathcal{P})_S - (\mathcal{L} + \mathcal{P})_N].$$

Если нуль шкалы уровня вблизи объектива, то знак плюс перед квадратной скобкой соответствует наблюдениям при КЛ, а знак минус при КП; $(\mathcal{L} + \mathcal{P})_S$ и $(\mathcal{L} + \mathcal{P})_N$ — средние суммы отсчетов по талькоттовскому уровню для наблюдений южной и северной звезд пары.

2. Поправка за ускорение движения звезд пары по зенитному расстоянию, на основании (7.103), вычисляется по формуле

$$\Delta x_v = \frac{\Delta l_{v_N} - \Delta l_{v_S}}{\cos A_S - \cos A_N} = - \frac{\Delta l_{v_S} - \Delta l_{v_N}}{2 \cos A_S}. \quad (7.105)$$

Для симметричной сетки нитей поправка зенитного расстояния (свободного члена) вычисляется по формуле (5.62)

$$\Delta l_v = \Delta z_v = 0,454 \frac{n+1}{n-1} \frac{d^2 z}{dt^2} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)^2,$$

где n — число нитей сетки; $T_n - T_1$ — разность моментов наблюдений на n и 1-ой нитях; $\frac{d^2 z}{dt^2} = \cos \varphi \sin \varphi \cos A + \cos^2 \varphi \cos^2 A \operatorname{ctg} z$ — численное значение второй производной зенитного расстояния по времени.

Так как численное значение скорости изменения зенитного расстояния

$$\frac{dz}{dt} = \cos \varphi \sin A$$

одинаково для обеих звезд пары, то, следовательно,

$$(T_n - T_1)_N = (T_n - T_1)_S. \quad (7.106)$$

Поэтому формулу (7.105) с учетом (5.62) и (7.106) можно представить в виде

$$\Delta x'_v = -0,454 \frac{n+1}{n-1} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)_S^2 \frac{\left(\frac{d^2z}{dt^2} \right)_S - \left(\frac{d^2z}{dt^2} \right)_N}{2 \cos A_S}. \quad (7.107)$$

Рассмотрим значение разности

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2z}{dt^2} \right)_S - \left(\frac{d^2z}{dt^2} \right)_N &= (\cos \varphi \sin \varphi \cos A_S + \cos^2 \varphi \cos^2 A_S \operatorname{ctg} z) - \\ &- (\cos \varphi \sin \varphi \cos A_N + \cos^2 \varphi \cos^2 A_N \operatorname{ctg} z) = \cos \varphi \sin \varphi (\cos A_S - \\ &- \cos A_N) + \cos^2 \varphi \operatorname{ctg} z (\cos^2 A_S - \cos^2 A_N). \end{aligned}$$

При соблюдении условия симметричности выбора звезд пары относительно первого вертикала ($A_N = 180^\circ - A_S$) имеем

$$\cos A_S - \cos A_N = 2 \cos A_S;$$

$$\cos^2 A_S - \cos^2 A_N = 0.$$

Таким образом,

$$\left(\frac{d^2z}{dt^2} \right)_S - \left(\frac{d^2z}{dt^2} \right)_N = \cos \varphi \sin \varphi 2 \cos A_S = \sin 2\varphi \cos A_S. \quad (7.108)$$

Подставив (7.108) в (7.107), получим

$$\Delta x''_v = -0,227 \frac{n+1}{n-1} \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)_S^2 \sin 2\varphi_0. \quad (7.109)$$

Для данного теодолита и данного пункта

$$k_v = 0,227 \frac{n+1}{n-1} \sin 2\varphi_0 = \text{const},$$

поэтому окончательное значение поправки за ускорение будет

$$\Delta x_v = -k_v \left(\frac{T_n - T_1}{100} \right)_S^2. \quad (7.110)$$

3. Поправка за влияние суточной абберации, в соответствии с формулой (7.103), будет

$$\Delta \lambda_a = \frac{\Delta l_{a_N} - \Delta l_{a_S}}{2 \cos A_S}. \quad (7.111)$$

Поправка зенитного расстояния светила (свободного члена уравнения поправок), согласно теории суточной абберации, определяется формулой

$$\Delta l_a = \Delta z_a = 0,32'' \cos \varphi \cos z \sin A.$$

Подставив это значение Δl_a в (7.111), получим

$$\Delta x_a = \frac{0,32'' \cos \varphi \cos z}{2 \cos A} (\sin A_N - \sin A_S).$$

При соблюдении $A_N = 180^\circ - A_S$,

$$\sin A_N - \sin A_S = 0,$$

и, следовательно,

$$\Delta x_a = 0. \quad (7.112)$$

4. Поправка за неверно принятое значение долготы на основании решения системы уравнений (7.5) для каждой пары звезд будет

$$\Delta x_y = - \frac{[bc]}{[bb]} y. \quad (7.113)$$

При строгом соблюдении условия симметричности (7.87) для любого достаточно малого значения $y = 15 \cos \varphi \Delta \lambda$, получим

$$\Delta x_y = 0. \quad (7.114)$$

Как известно, в основу расчетов эфемерид пар Певцова положено строгое соблюдение условия симметричности (7.87) для наблюдений звезд на средней горизонтальной нити, соответствующей установке трубы на $z_{эф}$ с точностью 1—2'.

Таким образом, формула для вычисления x из наблюдений пары звезд, с учетом необходимых поправок, имеет вид

$$x_i = \frac{z'_{0N} - z'_{0S}}{\cos A_S - \cos A_N} + \Delta x_i + \Delta x_v, \quad P_\lambda = 2 \cos^2 A_S. \quad (7.115)$$

5. Вычисление широты пункта.

Оценка точности

Вычисление широты пункта по наблюдениям пар Певцова включает следующие операции:

обработку журнала наблюдений,

вычисление значений x_i из наблюдений пар звезд,

вывод окончательного значения широты и оценку точности конечного результата.

Обработка журнала наблюдений выполняется в следующем порядке:

обрабатывается прием радиосигналов времени, выводится значение часового хода ω и поправка хронометра u_0 в момент X , подсчитывается средний момент наблюдения T_H каждой звезды,

подсчитывается среднее значение сумм отсчетов по концам пузырька уровня,

вычисляется поправка за разность наклонов оси талькоттовского уровня по формуле (7.104),

вычисляется поправка за ускорение движения звезд по формуле (7.110);

подсчитывается сумма поправок по формуле

$$\Sigma = \Delta x_i + \Delta x_v. \quad (7.116)$$

Вычисление значений x_i

Действия	Номер пары	
	231	
	Номер звезды	
	$N - 266$	$S - 378$
T_H	$17^{\text{h}}00^{\text{m}}28,64^{\text{s}}$	$17^{\text{h}}22^{\text{m}}42,43^{\text{s}}$
u_0	+52,98	+52,98
$\omega (T_H - X)$	-0,05	0,00
s	17 01 21,57	17 23 35,41
α	10 21 10,28	15 34 17,23
t_0^{h}	6 40 11,29	1 39 18,18
t_0°	$100^{\circ} 02' 49,35''$	$24^{\circ} 49' 32,70''$
φ_0	55 45 30,00	55 45 30,00
δ	65 46 46,57	15 32 59,37
$\varphi_0 - \delta$	10 01 16,57	$40^{\circ} 12' 30,63''$
$\varphi_0 + \delta$	121 32 16,57	71 18 29,37
$\cos (\varphi_0 - \delta)$	0,984743	0,763700
$1 + \cos t_0$	0,825543	1,907589
$\cos (\varphi_0 + \delta)$	-0,523063	0,320477
$1 - \cos t_0$	1,174457	0,092411
$\cos z'_0$	0,713631	0,713605
z'_0	$44^{\circ} 28' 07,9''$	$44^{\circ} 28' 15,6''$
$z'_{0N} - z'_{0S}$		-7,7"
$\cos A_S - \cos A_N$		1,6340
x'		-4,71"
\sum		+1,01"
x		-3,70"

Пример обработки наблюдений в журнале см. в табл. 50.

Вычисление значений x_i производится по формуле (7.115).
Пример вычислений приведен в табл. 51.

Если видимые координаты звезд не исправлялись поправками за влияние короткопериодических членов нутации, то этой поправкой необходимо исправить вычисленные значения x_i по формуле

$$\delta x_{\text{nut}} = g' \cos (G' + s_{\text{cp}}).$$

Если в течение вечера наблюдалось несколько пар подряд в интервале 2—3 ч, то для всей совокупности этих наблюдений можно вычислить одну поправку δx_{nut} . При этом величины g' и G' интерполируют на средний момент данного интервала времени.

Вывод окончательного значения x_{cp} и широты пункта производится по формулам (7.90) и (7.91). Оценка точности выполняется по формулам (7.92) и (7.93). Уравненное значение широты приводится к центру геодезического знака и к среднему полюсу.

Пример окончательного вывода x_{cp} и φ приведен в табл. 52.

Вычисление широты пункта Сидорова $\varphi_0 = 55^\circ 45' 30,00''$

Дата	Номер пары	Номер звезды	Азимуты A	$P_{x_i} = 2 \cos^2 A_S$	x_i	v_x	v_x^2
1978 г.							
18/19—IV	229	N—341 S—397	162° 20' 17 40	1,82	—2,90"	—0,49"	0,2401
18/19—IV	231	N—266 S—378	144 47 35 13	1,34	—3,70	+0,31	0,0961
18/19—IV	237	S—447 N—581	337 58 202 02	1,72	—2,20	—1,19	1,4161
18/19—IV	242	S—422 N—341	22 06 157 54	1,72	—4,53	+1,14	1,2996
	246	N—360 S—435	151 34 28 28	1,56	—4,08	+0,69	0,4761
21/22—IV	227	N—460 S—433	208 20 331 40	1,56	—3,07	—0,32	0,1024
21/22—IV	232	N—271 S—396	156 59 23 01	1,70	—3,34	—0,05	0,0025
21/22—IV	237	S—447 N—581	337 58 202 02	1,72	—2,75	—0,64	0,4096
	243	S—474 N—531	326 33 213 27	1,39	—3,62	+0,23	0,0529
21/22—IV	248	S—424 N—289	26 45 153 15	1,60	—4,15	+0,76	0,5776
21/22—IV	254	S—440 N—367	33 22 146 38	1,40	—2,95	—0,44	0,1936
22/23—IV	233	S—376 N—310	36 26 143 34	1,30	—2,17	—1,22	1,4884
22/23—IV	238	S—461 N—526	323 37 216 23	1,30	—3,63	+0,24	0,0576
22/23—IV	242	S—422 N—341	22 06 157 54	1,72	—4,24	+0,85	0,7225
				$[P_{x_i}] =$ $= 21,85$	$x_{cp} =$ $= -3,39''$	$[P v_x] =$ $= -0,05''$	$[P_x v_x^2] =$ $= 11,2132$

$$\varphi = \varphi_0 + x_{cp} = 55^\circ 45' 30,00'' - 3,39'' = 55^\circ 45' 26,61''$$

$$\mu_x = \sqrt{\frac{[P_x v_x^2]}{n-1}} = \sqrt{\frac{11,2132}{13}} = 0,92''$$

$$M_\varphi = M_x = \frac{\mu_x}{\sqrt{[P_{x_i}]}} = \frac{0,92''}{\sqrt{21,85}} = 0,20''$$

РАЗДЕЛ III

**АЗИМУТАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ
АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ**

Г Л А В А 8

**ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
НАПРАВЛЕНИЙ НА СВЕТИЛА**

**§ 51. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ НА СВЕТИЛА**

В азимутальных способах астрономических определений измеряемыми величинами являются горизонтальные направления на светила. Если стоит задача определения азимута направления на местный предмет, то дополнительной измеряемой величиной является также горизонтальное направление на местный предмет. В этом случае в зависимости от применяемой методики наблюдения в качестве измеряемой величины можно также считать горизонтальный угол Q между вертикалом светила и вертикалом предмета.

На рис. 83 горизонтальный круг прибора совмещен с плоскостью астрономического горизонта, а центр круга — с проекцией зенита z . Полуденная линия NS представляет собой след сечения плоскости меридиана с плоскостью горизонта. При данной ориентировке горизонтального круга имеем:

- 0 — нулевой диаметр лимба (нулевое направление);
- M_N — место Севера — отсчет на лимбе (горизонтальное направление), соответствующий направлению на Север;
- M_S — место Юга; $M_S = M_N \pm 180^\circ$;
- N_i — горизонтальное направление на светило σ ;
- M_i — горизонтальное направление на местный предмет M ;
- Q — горизонтальный угол между вертикалами светила и предмета.

В функции измеренного горизонтального направления азимут светила, отсчитываемый от точки Севера, определяется формулой

$$A = N_i - M_N. \quad (8.1)$$

Необходимо отметить, что знак перед M_N не меняется с переводом трубы теодолита через зенит. Поэтому в среднем значении A , полученном из наблюдений при двух кругах, величина M_N не исключается, подобно тому как может быть исключено значение M_z при измерении зенитных расстояний светил.

Азимут направления на местный предмет можно представить в виде

$$a = M_i - M_N, \quad (8.2)$$

где

$$M_N = N_i - A,$$

или

$$a = A + Q, \quad (8.3)$$

где

$$Q = M_i - N_i.$$

Особенности измерений горизонтальных направлений на светила, так же как и при измерении их зенитных расстояний, прежде всего связаны с методикой визирования. Так как горизонтные координаты светил непрерывно меняются вследствие вращения Земли вокруг своей оси, то измерение горизонтальных направлений на светила необходимо производить в определенной системе счета времени.

Вследствие этого процесс визирования на светило связан с отсчетами показаний хронометра в моменты наведения вертикальной нити на светило или в моменты прохождения светила через вертикальные нити неподвижной по азимуту трубы теодолита.

Визирование путем наведения вертикальной нити на светило под счет ударов хронометра целесообразно применять только для наблюдений близполюсных звезд (например Полярной) и звезд в положении элонгации, где изменения азимута светила происходят чрезвычайно медленно.

Визирование путем наблюдения моментов прохождения светила через вертикальные нити неподвижной трубы теодолита необходимо применять во всех случаях, когда азимут наблюдаемого светила изменяется достаточно быстро.

Точно так же, как и при измерении зенитных расстояний светил, для ослабления личных погрешностей наблюдателя, характерных для метода «глаз—ухо», визирование на светило при измерении горизонтальных направлений целесообразно осуществлять с помощью контактного микрометра (полуавтоматический метод визирования) или фотоэлектрической регистрации

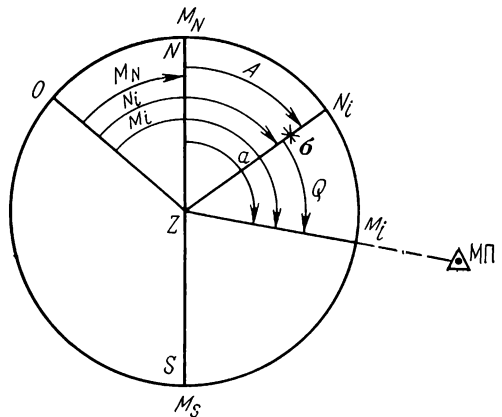


РИС. 83

звездных прохождений (автоматический метод визирования). Кроме особенностей, связанных с методикой визирования, измерения горизонтальных направлений на светила производятся не вблизи горизонта, а на всевозможных зенитных расстояниях. Поэтому измеренные горизонтальные направления на светила необходимо с особой тщательностью исправлять поправками за наклон горизонтальной оси теодолита, за влияние коллимационной ошибки, за боковое гнутие трубы, за погрешности цапф и другие погрешности, зависящие от зенитных расстояний наблюдаемых светил.

Исключение влияния систематических и случайных погрешностей диаметров горизонтального лимба производится путем подбора целесообразной программы перестановки круга между приемами, а также применением способов, в которых отсчеты по лимбу не производятся.

Кроме приборных погрешностей, на результаты измерений горизонтальных направлений оказывают влияние внешние источники погрешностей (боковая рефракция, кручение столба) и личные погрешности наблюдателя. В азимутальных способах астрономических определений необходимо исключать эти погрешности целесообразно построенной методикой наблюдений или учитывать их в результатах наблюдений.

Рассмотрим кратко влияние указанных погрешностей на измеренные горизонтальные направления, а также методику исключения или учета влияния этих погрешностей.

§ 52. ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ ПРИБОРА НА ИЗМЕРЯЕМОЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

Если горизонтальная ось теодолита наклонена к горизонту HN на угол b (рис. 84), то перпендикулярная к ней визирная ось трубы при наведении на светило σ будет описывать на небесной сфере большой круг $Z'\sigma L'$, наклоненный к плоскости истинного вертикала $Z\sigma L$ на тот же угол b .

В результате вместо верного отсчета горизонтального лимба L будет произведен неверный отсчет L' .

Если для наблюдателя, обращенного лицом к светилу, правый конец оси выше левого, то для получения правильного отсчета L нужно из неправильного отсчета L' вычесть дугу x : если левый

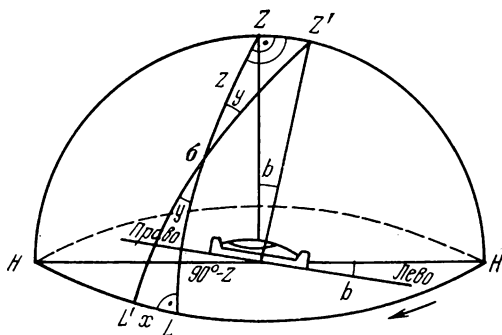


РИС. 84

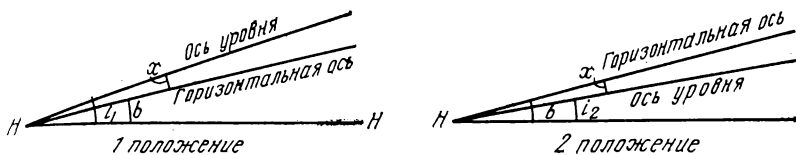


РИС. 85

конец оси выше правого, то соответствующую поправку нужно прибавить. Таким образом, получим

$$L = L' \pm x. \quad (8.4)$$

Абсолютная величина поправки за наклон определится из решения прямоугольных треугольников ZoZ' и $L\sigma L'$, из которых соответственно имеем

$$\sin z = \text{tg } b \text{ ctg } y;$$

$$\cos z = \text{tg } x \text{ ctg } y.$$

Поделив первое равенство на второе, получим

$$\text{tg } z = \frac{\text{tg } b}{\text{tg } x},$$

откуда

$$\text{tg } x = \text{tg } b \text{ ctg } z.$$

Вследствие малости b и x , ограничиваясь членами разложения первого порядка, будем иметь окончательно

$$x = b \text{ ctg } z. \quad (8.5)$$

Приписывая знак поправки самой наклонности, получим общую формулу редукции за наклон в виде

$$L = L' + b \text{ ctg } z, \quad (8.6)$$

где b считается положительной, когда левый конец оси выше правого, и отрицательной, когда правый конец оси выше левого. Наклон горизонтальной оси определяется с помощью накладного (подвесного) уровня.

При этом под наклоном горизонтальной оси понимается наклон оси уровня, определяемый по отсчетам концов пузырька, исправленный за нуль-пункт и за неравенство диаметров цапф. Влияние неравенства диаметров цапф исключается из результатов наблюдений одного и того же предмета при двух положениях вертикального круга теодолита.

Для исключения влияния нуль-пункта (нуль-пунктом называется угол x между осью уровня и горизонтальной осью теодолита) определение наклона производится при двух положениях уровня на оси. Пусть при первом положении горизонтальная ось и ось уровня составляют с горизонтом углы b и i_1 (рис. 85).

В этом случае наклон горизонтальной оси будет

$$b = i_1 - x.$$

После изменения положения уровня на оси на 180° (см. рис. 85, положение 2) получим

$$b = i_2 + x.$$

В среднем из двух положений уровня наклон горизонтальной оси определяется по формуле

$$b = \frac{i_1 + i_2}{2}. \quad (8.7)$$

Из этих же определений можно вычислить значение нуля-пункта уровня

$$x = \frac{i_1 - i_2}{2}. \quad (8.8)$$

Наклон оси уровня в полуделениях, по отсчетам его пузырька, определяется следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= [(Л + П)_0 - m], \text{ когда ноль справа;} \\ i_1 &= [m - {}_0(Л + П)], \text{ когда ноль слева.} \end{aligned} \right\} \quad (8.9)$$

Подставив значения (8.9) в формулы (8.7) и (8.8), получим выражения для определения наклона горизонтальной оси и нуля-пункта уровня

$$b = \frac{(Л + П)_0 - {}_0(Л + П)}{2}; \quad (8.10)$$

$$x = \frac{2m - [(Л + П)_0 + {}_0(Л + П)]}{2}. \quad (8.11)$$

Наклон горизонтальной оси, выраженный в градусной мере, будет

$$b = \frac{(Л + П)_0 - {}_0(Л + П)}{2} \frac{\tau}{2}. \quad (8.12)$$

Если уровень не перекадывается на оси, то в этом случае по формуле (8.12) выводят среднее значение наклона горизонтальной оси для наблюдений, выполненных при двух кругах.

Определение наклона горизонтальной оси при измерении горизонтальных направлений на светила нужно производить с особой тщательностью, особенно на малых зенитных расстояниях, так как эта погрешность оказывает влияние на точность измерения горизонтального направления пропорционально $\operatorname{ctg} z$.

§ 53. ВЛИЯНИЕ КОЛЛИМАЦИОННОЙ ОШИБКИ НА ИЗМЕРЯЕМОЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

Если бы коллимационная ошибка отсутствовала ($c = 0$), то при визировании на светило σ бесколлимационная плоскость (большой круг) теодолита совпала с вертикалом светила $Z\sigma$ и на

горизонтальном круге был бы прочитан правильный отсчет L (рис. 86). При наличии коллимационной ошибки c визирная ось трубы, совмещенная со светилом σ , опишет на небесной сфере малый круг qq' , а большой круг прибора сместится от вертикала светила и займет положение ZkL' . При этом большой круг ZkL' будет отстоять от малого круга qq' на величину c .

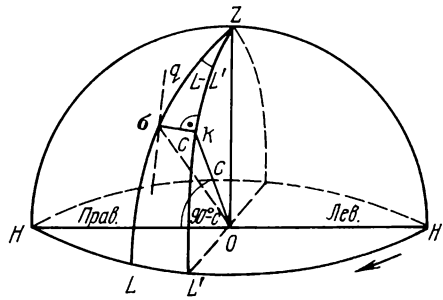


РИС. 86

В результате на горизонтальном лимбе будет прочитан неправильный отсчет L' .

Влияние коллимационной ошибки на измеряемое горизонтальное направление можно найти из решения прямоугольного сферического треугольника Zok :

$$\sin c = \sin(L - L') \sin z.$$

По малости c и $(L - L')$ получим

$$L - L' = c \operatorname{cosec} z, \quad (8.13)$$

откуда

$$L = L' \pm c \operatorname{cosec} z. \quad (8.14)$$

В соответствии с рис. 86 поправка за коллимационную ошибку будет положительна, когда визирная ось составляет с правым концом горизонтальной оси угол $90^\circ - c$, и отрицательна, когда этот угол равен $90^\circ + c$. Очевидно, в наблюдениях, выполненных при разных положениях вертикального круга прибора (КЛ и КП), коллимационная ошибка войдет с разными знаками, т. е. будем, например, иметь:

$$\left. \begin{aligned} L &= L' - c \operatorname{cosec} z_L - \text{для КЛ;} \\ R &= R' + c \operatorname{cosec} z_R - \text{для КП.} \end{aligned} \right\} \quad (8.15)$$

Среднее значение наблюдаемого горизонтального направления будет

$$\begin{aligned} N' &= \frac{L + (R \pm 180^\circ)}{2} = \frac{L' + (R' \pm 180^\circ)}{2} + \\ &+ c \frac{1}{2} (\operatorname{cosec} z_R - \operatorname{cosec} z_L). \end{aligned} \quad (8.16)$$

Для наблюдений земного предмета вблизи горизонта, где $\operatorname{cosec} z_L = \operatorname{cosec} z_R = 1$, формула (8.16) примет вид

$$N' = \frac{L' + (R' \pm 180^\circ)}{2}. \quad (8.16')$$

z	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$\frac{c}{2} (\operatorname{cosec} z_R - \operatorname{cosec} z_L)$	2,58"	0,67"	0,29"	0,16"	0,09"	0,06"	0,03"	0,02"	0"

Значение коллимационной ошибки, выведенное из тех же наблюдений,

$$c = \frac{L' - (R' \pm 180^\circ)}{2}. \quad (8.17)$$

Таким образом, из результатов наблюдений горизонтальных направлений, выполненных при двух кругах, влияние коллимации исключается полностью только в том случае, если $z_R = z_L$.

Если при наблюдениях светил положить $z_R - z_L = 1^\circ$ и $c = 10''$, то для различных зенитных расстояний поправочный член за коллимационную ошибку в формуле (8.16) можно представить в виде табл. 53.

Из табл. 53 следует, что при наблюдениях светил на малых зенитных расстояниях влиянием коллимационной ошибки пренебрегать нельзя даже при наблюдениях, выполненных при двух кругах. В точных способах астрономических определений это влияние необходимо учитывать.

Говоря о коллимационной ошибке теодолита, необходимо ясно представить себе различие между коллимацией, определяемой как угол между коллимационной плоскостью и плоскостью большого круга теодолита (или угол между визирной осью и перпендикуляром к горизонтальной оси), и значением коллимационной ошибки, вычисленной по отсчетам горизонтального лимба (или по показаниям хронометра, соответствующим моментам прохождений звезд через коллимационную плоскость прибора).

Изменение коллимации как таковой будет зависеть от сравнительно небольшого числа причин, влияющих на изменение угла между визирной осью и перпендикуляром к горизонтальной оси. Изменение этого угла может произойти вследствие:

относительного смещения частей оптической системы трубы в плоскости, перпендикулярной к коллимационной плоскости прибора;

изменения возможного прогиба горизонтальной оси. Последнее обстоятельство мало вероятно для небольших астрономических приборов в течение относительно коротких промежутков времени.

Изменения во взаимном положении частей оптической системы могут быть вызваны:

температурным воздействием среды и наблюдателя на отдельные части оптической системы; при этом особенно заметно будут сказываться неравномерные, резкие изменения температуры; различным действием силы тяжести на отдельные части оптической системы при разных положениях трубы по высоте.

Обе эти причины, влияющие в совокупности на взаимное положение частей оптической системы, могут изменять значение коллимации.

Действие указанных факторов на изменение коллимационной ошибки еще недостаточно изучено. Однако полагая, что изменение температуры во время работы происходит равномерно и сравнительно медленно, мы вправе ожидать незначительных изменений коллимационной ошибки.

Совершенно иную картину будем иметь, если станем рассматривать значения и изменения коллимационной ошибки, выведенной по отсчетам горизонтального лимба теодолита. Вполне очевидно, что в этом случае истинное значение коллимации будет искажено влиянием значительной части тех погрешностей, которые нашли свое отражение в отсчетах горизонтального лимба.

Так, например, значения коллимационной погрешности содержат в себе погрешности отсчетов горизонтального лимба, визирования, азимутальные сдвиги горизонтальной оси при перемещении трубы по зенитному расстоянию, обусловленные главным образом погрешностями цапф, погрешности наклона горизонтальной оси, которые входят в отсчет горизонтального лимба пропорционально $\text{ctg } z$, азимутальные сдвиги горизонтальной оси, вызываемые гнутием всей алидадной части прибора, азимутальные сдвиги теодолита, обусловленные азимутальными сдвигами столба или столика, на котором установлен теодолит, и т. д.

Именно поэтому колебания величины коллимационной ошибки, выведенной по отсчетам круга, являются лучшей характеристикой работы прибора и наблюдателя за вечер наблюдений.

Систематическая разность в значении коллимации при наблюдении различных предметов показывает на то, что направление, наблюдения которого дают величину коллимации, отличную от ее значений при наблюдениях других предметов, искажено влиянием каких-то систематических погрешностей.

Так, одной из главных причин систематического расхождения значений коллимационной ошибки по наблюдениям земного предмета и Полярной звезды — расхождения, весьма часто встречающегося в практике определения азимута по Полярной, — безусловно является влияние бокового гнутия, а также влияние погрешностей цапф наклон и азимут горизонтальной оси, которое в функции разности отсчетов горизонтального лимба входит полностью в вычисленное значение коллимационной ошибки.

§ 54. ПОПРАВКИ ЗА ОТСЧЕТЫ ОКУЛЯРНЫХ МИКРОМЕТРОВ ГЛАВНОЙ И ПОВЕРИТЕЛЬНОЙ ТРУБ

В точных азимутальных способах для измерения горизонтальных направлений на некоторые светила (например, на Полярную звезду) и на земной предмет применяют окулярные микрометры главной трубы, а при наблюдениях со столика геодезического сигнала, для учета его кручения, — также и окулярный микрометр поверительной трубы. Визирования с помощью подвижной нити окулярного микрометра главной трубы равносильны искусственному введению дополнительной коллимационной погрешности. При отсчете в нуль-пункте гребенки микрометра, равном 10 оборотам, формула поправки за микрометр главной трубы будет

$$\Delta_{г. т} = (M - 10^{06}) \mu_{г. т} \operatorname{cosec} z, \quad (8.18)$$

где M — отсчет по головке окулярного микрометра при наведении подвижной нити на объект наблюдения; $\mu_{г. т}$ — цена оборота микрометра главной трубы.

Условившись вести счет оборотов (зубцов гребенки) по направлению к головке микрометра, будем иметь, при возрастании отсчетов лимба по ходу часовой стрелки, следующие знаки поправок:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при КЛ: } \Delta_{г. т} = + (M - 10^{06}) \mu_{г. т} \operatorname{cosec} z; \\ \text{при КП: } \Delta_{г. т} = - (M - 10^{06}) \mu_{г. т} \operatorname{cosec} z. \end{array} \right\} \quad (8.19)$$

Для поправки за окулярный микрометр поверительной трубы будем иметь аналогичную формулу

$$\Delta_{п. т} = \pm (M_{п. т} - 10^{06}) \mu_{п. т} \operatorname{cosec} z_{з. п}, \quad (8.20)$$

где $M_{п. т}$ — отсчет по головке микрометра поверительной трубы; $\mu_{п. т}$ — цена оборота микрометра поверительной трубы.

Если зенитное расстояние земного предмета близко к 90° , то

$$\Delta_{п. т} = \pm (M_{п. т} - 10^{06}) \mu_{п. т}. \quad (8.21)$$

В формуле (8.21) знак плюс берется в том случае, если труба вложена так, что головка находится справа от линии окуляр — объектив, в обратном случае — знак минус.

Отсчеты горизонтального лимба, приведенные к нуль-пунктам микрометров, будут иметь вид

$$\left. \begin{array}{l} L' = L_0 + (M - 10^{06}) \mu_{г. т} \operatorname{cosec} z_L \pm \\ \pm (M_{п. т} - 10^{06}) \mu_{п. т} \operatorname{cosec} z_{з. п}; \\ R' = R_0 - (M - 10^{06}) \mu_{г. т} \operatorname{cosec} z_R \pm \\ \pm (M_{п. т} - 10^{06}) \mu_{п. т} \operatorname{cosec} z_{з. п}. \end{array} \right\} \quad (8.22)$$

С учетом поправок за наклон горизонтальной оси, коллимационную ошибку и гуп микроскопов-микрометров, измеренные направления при КЛ и КП будут:

$$\left. \begin{aligned} L &= L' + b_L \operatorname{ctg} z_L - c \operatorname{cosec} Z_L + \operatorname{гуп}_L; \\ R &= R' + b_R \operatorname{ctg} z_R + c \operatorname{cosec} z_R + \operatorname{гуп}_R. \end{aligned} \right\} \quad (8.23)$$

Среднее значение измеренного направления при двух кругах представится формулой

$$N = \frac{L + R}{2} = \frac{L' + (R' \pm 180^\circ)}{2} + \frac{b_L \operatorname{ctg} z_L + b_R \operatorname{ctg} z_R}{2} + \frac{c}{2} (\operatorname{cosec} z_R - \operatorname{cosec} z_L) + \operatorname{гуп}_{\text{ср}}. \quad (8.24)$$

§ 55. ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОРМЫ ЦАПФ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ

Если форма цапф горизонтальной оси в своем сечении, перпендикулярном к оси, не совпадает с окружностью, а представляется в виде замкнутой непрерывной кривой, близкой к окружности (рис. 87), то при вращении трубы по высоте будет изменяться положение горизонтальной оси в пространстве в соответствии с неправильностями обеих цапф. При этом азимут главной плоскости прибора и наклон горизонтальной оси будут изменяться по какому-то закону, зависящему от формы цапф; следовательно, измеренные горизонтальные направления на объекты, расположенные на разной высоте, будут искажены влиянием погрешностей цапф.

Для одних и тех же зенитных расстояний это влияние будет систематическим. Нетрудно подсчитать, что при длине горизонтальной оси астрономического теодолита, равной 20 см, погрешность в 1 мкм может дать систематическую погрешность в горизонтальном направлении порядка 1".

В точных способах астрономических определений погрешности такого порядка нельзя не учитывать. Поэтому форму цапф горизонтальной оси необходимо тщательно исследовать, и на основе этих исследований исправлять измеренные горизонтальные направления поправками за неправильность цапф.

Есть много способов исследования формы цапф, различающихся как по идее, так и по конструктивному оформлению вспомогательных приборов для исследований. Однако следует заметить,

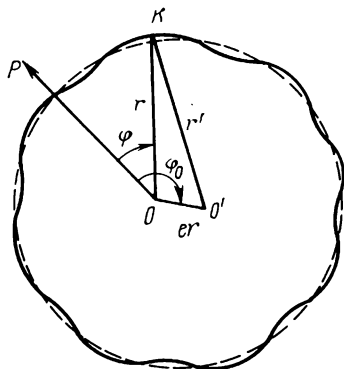


РИС. 87

что если цапфы прибора имеют большие и неправильно изменяющиеся погрешности, то ни один из современных способов исследований не может дать систему реальных поправок в измеряемые горизонтальные направления. Такая система поправок может быть получена более или менее уверенно только для плавно изменяющейся формы рабочего сечения цапф с небольшими (до микрометра) отклонениями от окружности.

Если в результате исследований установлена довольно сложная форма рабочего сечения с большими (больше микрометра) отклонениями от окружности, то цапфы такого прибора необходимо перешлифовать и заново исследовать.

Методика таких исследований с помощью прецизионного интерферометра Уверского ПИУ-2 разработана в ЦНИИГАиК А. М. Старостиным и опубликована в трудах ЦНИИГАиК, вып. 148.

В данном параграфе мы рассмотрим кратко лишь принципиальную сторону вопроса влияния погрешностей цапф на измеряемые горизонтальные направления.

Прежде всего нужно уточнить определение самой горизонтальной оси прибора и поправки в «наклон горизонтальной оси» или, в конечном счете, в измеренное горизонтальное направление. При идеально круговой форме цапф горизонтальная ось теодолита есть прямая, соединяющая центры кругов, представляющих рабочие сечения цапф.

В общем же случае, когда форма цапф отличается от окружности и представляется замкнутой непрерывной кривой, близкой к окружности, вопрос выбора центра этой кривой довольно сложен. Аналитическое выражение непрерывной кривой, близкой к окружности, можно представить в виде ряда Фурье. Для этого выберем приблизительно в середине цапфы точку O и примем ее за полюс некоторой Полярной системы с осью OP (см. рис. 87). Кривая сечения цапфы в полярных координатах r и A будет иметь вид

$$r = r_0 + a_1 \cos(\varphi + A_1) + a_2 \cos(2\varphi + A_2) + a_3 \cos(3\varphi + A_3) + \dots$$

или (8.25)

$$r = r_0 + \sum_{k=1}^{k=n} a_k \cos(k\varphi + A_k). \quad (8.26)$$

Здесь коэффициенты a_2, a_3, \dots, a_n характеризуют неправильности цапфы, а коэффициент a_1 зависит исключительно от выбора полюса O полярной системы. Коэффициенты a_2, a_3, \dots, a_n — величины малые сравнительно с радиусом r_0 и обычно не превышают нескольких микрометров. Для доказательства того, что коэффициент a_1 зависит от выбора полюса, примем точку O' за полюс новой системы координат. Из треугольника KOO' следует

$$r'^2 = r^2 [1 + e^2 - 2e \cos(\varphi - \varphi_0)],$$

где r' — радиус-вектор в новой системе координат, φ_0 — аргумент нового полюса O' в старой системе, er — расстояние между полюсами, выраженное в долях радиуса.

Пренебрегая по малости e величиной e^2 , получим

$$r = r \sqrt{1 - 2e \cos(\varphi - \varphi_0)}$$

или, разложив в ряд и ограничиваясь величинами первого порядка малости, будем иметь

$$r' = r - er \cos(\varphi - \varphi_0). \quad (8.27)$$

Таким образом, уравнение (8.26) с учетом (8.27) может быть переписано для нового полюса O' в виде

$$r' = r_0 + [a_1 \cos(\varphi + A_1) - er \cos(\varphi - \varphi_0)] + \sum_{k=2}^{k=n} a_k \cos(k\varphi + A_k). \quad (8.28)$$

Из уравнения (8.28) следует, что всегда можно на цапфе найти такую точку, исходя из которой как из полюса полярной системы, уравнение сечения примет вид

$$r = r_0 + \sum_{k=2}^{k=n} a_k \cos(k\varphi + A_k) \quad (8.29)$$

и не будет содержать члена первой кратности аргумента (первой гармоники). Для этой цели достаточно выбрать e и φ_0 так, чтобы

$$er = a_1; \quad \varphi_0 = -A_1.$$

Примем за центр сечения цапфы полюс O' такой полярной системы, исходя из которой уравнение сечения цапфы имеет вид (8.29).

Таким образом, за горизонтальную ось прибора принимается некоторая прямая, соединяющая точки, расположенные вблизи геометрических центров обеих цапф. Эти точки должны удовлетворять необходимым требованиям: если принять каждую из них за полюс полярной системы координат, то уравнение рабочего сечения каждой цапфы должно иметь вид (8.29) и не содержать члена первой кратности аргумента, а отклонение фигур цапф от средней окружности с радиусом r_0 должно быть минимальным.

Прямая, соединяющая подобные центры O' сечения обеих цапф, и принимается за горизонтальную ось вращения прибора. Эта ось жестко связана с механической осью теодолита и образует постоянный угол с направлением его визирной оси.

Под неправильностями или погрешностями цапф понимаются отклонения отдельных радиусов от среднего радиуса цапфы,

или иными словами, разность между радиус-вектором r и радиусом средней окружности r_0 , т. е.

$$\Delta r = r - r_0 = \sum_{k=2}^{k=n} a_k \cos(k\varphi + A_k). \quad (8.30)$$

За начальное направление радиус-вектора r , от которого отсчитываются углы φ , принимают направление, параллельное визирной линии. Таким образом, если труба направлена в зенит, то точка цапфы, для которой $\varphi = 0$, находится наверху. Для упрощения вывода формул, характеризующих влияния неправильностей цапф на азимут и наклона горизонтальной оси, полагают, что:

точки касания цапф с лагерами и подставками накладного уровня лежат в одной плоскости, перпендикулярной к горизонтальной оси;

углы между фасетами лагер и подставок уровня равны 90° . Равноделящие этих углов при правильной установке прибора и уровня будут вертикальны. При этих условиях цапфы касаются лагер в точках, зенитные расстояния радиусов-векторов которых будут 135° и 225° , а фасет подставок уровня — в точках, радиус-векторы которых имеют зенитные расстояния 45° и 315° ;

при работе с астрономическим теодолитом горизонтальная ось не перекаладывается в лагерах; наблюдение светила (предмета) при двух положениях вертикального круга осуществляется поворотом верхней части теодолита вокруг вертикальной оси и переводом трубы через зенит; при этом положение цапф и лагер будет постоянным по отношению к окуляру при любых положениях прибора.

Назовем фасеты обеих лагер, находящихся слева от окуляра (если смотреть в окуляр), левыми (Л), а справа — правыми (П); цапфу и лагери, расположенные около окуляра, назовем окулярными (О), а цапфу и лагери, расположенные около противовеса, — противовесными (Р) или ламповыми (Л).

При вращении трубы теодолита по зенитному расстоянию положение точек цапф будет изменяться относительно отвесной линии. Если какая-либо точка цапфы, имеющая погрешность Δr , касается поверхности лагера, то эта цапфа вместе с соответствующим концом оси смещается на величину Δr в направлении соответствующего радиуса-вектора. Часть цапфы, касающаяся другой фасеты той же лагера, скользит свободно по его поверхности параллельно ей, причем с погрешностью, не превышающей величину второго порядка относительно Δr .

Можно полагать, что здесь не происходит какого-либо дополнительного смещения оси прибора, поскольку погрешность этого участка цапфы на протяжении Δr можно считать постоянной. Если погрешности Δr обеих цапф, касающихся левых (или правых) сторон, одинаковы, то их суммарное действие вызовет только параллельное смещение оси теодолита, которое никак не отра-

зится на наклоне и азимуте горизонтальной оси. В общем же случае при различных значениях Δr будет иметь значение только разность погрешностей обоих радиусов-векторов.

Угол $\Delta\rho$, на который повернется горизонтальная ось теодолита, определяется из формулы

$$\Delta\rho = \frac{\Delta r_0 - \Delta r_p}{L \sin 1''}, \quad (8.31)$$

где L — расстояние между рабочими сечениями цапф, выраженное в тех же единицах, что и Δr .

Направление смещения будет перпендикулярно к поверхности соответствующих лагер. Очевидно, что $\Delta\rho$, так же как и Δr , является функцией угла φ . Отметим, что для обеих цапф принимается одно и то же значение φ для их одновременных касаний соответствующих сторон лагер. Реальный поворот горизонтальной оси в пространстве определится векторной суммой обоих смещений $\Delta\rho$, соответствующих левой и правой сторонам лагер.

Величина угла этого смещения будет равна

$$\Delta\rho_z = \sqrt{\Delta\rho_l^2 + \Delta\rho_p^2}, \quad (8.32)$$

а зенитное расстояние его направления определится формулой

$$z_\Sigma = \arctg \frac{\Delta\rho_l}{\Delta\rho_p} - 45^\circ. \quad (8.33)$$

При равных смещениях $\Delta\rho_l$ и $\Delta\rho_p$ поворот горизонтальной оси произойдет в направлении зенита. Заметим, что наши рассуждения мы вели для одного положения теодолита; допустим, что это положение было при КЛ.

При КП характер изменения $\Delta\rho$ в функции зенитного расстояния будет совершенно таким же, если аргументом вместо z положить $360^\circ - z$ и принять во внимание изменение знака.

Для суждения о влиянии неправильной формы цапф на наклон и азимут нас будет интересовать не столько сама величина полного угла поворота горизонтальной оси, выраженная вектором $\Delta\rho_\Sigma$, сколько проекции его на отвесную линию, определяющую влияние погрешностей цапф на наклон и на плоскость горизонта, характеризующую изменения азимута.

Наклон оси накладного уровня будет искажен влиянием погрешностей цапф в точках их касания с фасетами подставок уровня¹.

Согласно рассмотренным положениям о влиянии погрешностей цапф, проекция смещения на отвесную линию для одного

¹ Погрешности цапф в точках их касания с лагерами вызовут изменение наклона горизонтальной оси. Однако это изменение наклона будет учитываться накладным уровнем и, следовательно, мы можем его не принимать во внимание.

положения вертикального круга теодолита (КЛ) может быть вычислена по формуле

$$\Delta i_{\text{Л}} = - \frac{\cos 45^\circ}{L \sin 1''} (\Delta \rho_{z+45^\circ} + \Delta \rho_{z-45^\circ}), \quad (8.34)$$

где 45° — угол, образованный соответствующими радиусами-векторами, проведенными из центра сечения цапф в точки касания их с фасетами подставок уровня, с направлением отвесной линии; $z + 45^\circ$ и $z - 45^\circ$ — индексы, показывающие значения угла φ , соответствующие этим же точкам;

$$\Delta \rho_z = (\Delta r_z^0 - \Delta r_z^{\text{Л}}),$$

где Δr_z^0 , $\Delta r_z^{\text{Л}}$ — погрешности окулярной и ламповой цапф.

Для второго положения вертикального круга при наблюдении того же предмета изменится знак редукиции и, кроме того, значение угла φ , приведенное к первому положению прибора, обозначится соответственно индексами: $-z + 45^\circ$; $-z - 45^\circ$. Последнее означает, что фасет подставок уровня будут касаться точки цапф, радиусы-векторы которых составляют угол с соответствующими радиусами-векторами при первом положении прибора, равный $2z$.

Формула поправки в наклон горизонтальной оси за погрешности цапф при двух положениях вертикального круга будет иметь вид (считая наклон оси величиной положительной, если левый конец оси выше правого)

$$\Delta i_z'' = - \frac{\cos 45^\circ}{2L \sin 1''} (\Delta \rho_{z+45^\circ} + \Delta \rho_{z-45^\circ} - \Delta \rho_{-z+45^\circ} - \Delta \rho_{-z-45^\circ}), \quad (8.35)$$

где $\frac{\cos 45^\circ}{2 \sin 1''} = 72915$ — величина постоянная, L — длина горизонтальной оси (расстояние между серединами рабочих сечений цапф), выраженная в тех же единицах измерения, что и величина $\Delta \rho$.

Рассуждая аналогичным образом, получим формулу поправки в азимут за влияние погрешностей цапф. Изменение азимута горизонтальной оси при вращении трубы астрономического теодолита по зенитному расстоянию вызывается действием погрешностей цапф в точках их касания с лагерами подставок трубы.

Для вывода формулы, определяющей поправку в азимут Δa_z , необходимо взять с соответствующими знаками проекции смещения горизонтальной оси в точках касания цапф с лагерами на плоскость горизонта.

Для положения прибора КЛ азимутальное смещение определится по формуле

$$\Delta a_z^{\text{Л}} = \frac{\cos 45^\circ}{L \sin 1''} (\Delta \rho_{z+135^\circ} - \Delta \rho_{z+225^\circ}). \quad (8.36)$$

Для положения КП —

$$\Delta a_z^{\Pi} = \frac{\cos 45^\circ}{L \sin 1''} (\Delta \rho_{-z+135^\circ} - \Delta \rho_{-z+225^\circ}). \quad (8.37)$$

Для двух положений вертикального круга прибора при наведении на один и тот же предмет величина поправки определится как среднее арифметическое, т. е.

$$\begin{aligned} \Delta a_z'' &= \frac{\Delta a_z^{\Pi} + \Delta a_z^{\Pi}}{2} = \\ &= \frac{\cos 45^\circ}{2L \sin 1''} (\Delta \rho_{z+135^\circ} - \Delta \rho_{z+225^\circ} + \Delta \rho_{-z+135^\circ} - \Delta \rho_{-z+225^\circ}) \end{aligned}$$

или

$$\Delta a_z'' = \frac{72 \cdot 915}{L} (\Delta \rho_{z+135^\circ} - \Delta \rho_{z+225^\circ} + \Delta \rho_{-z+135^\circ} - \Delta \rho_{-z+225^\circ})^1. \quad (8.38)$$

Суммарное влияние погрешностей цапф на измеренное горизонтальное направление определится формулой

$$\Delta N_{ц}'' = \Delta a_z'' + \Delta i_z \operatorname{ctg} z. \quad (8.39)$$

§ 56. ВЛИЯНИЕ БОКОВОГО ГНУТИЯ ТРУБЫ

Под боковым гnutием трубы теодолита понимают боковое смещение визирной оси с изменением зенитных расстояний наблюдаемых объектов. Эти боковые смещения связаны с изменением взаимного положения частей оптической системы и могут быть вызваны:

несовершенным креплением частей оптической системы в теле трубы (креплением поворачивающей призмы, тубуса в окулярном колене трубы, креплением трубы к флянцу оси, креплением объектива в оправе и т. д.);

температурным воздействием среды и наблюдателя на отдельные части оптической системы; при этом особенно заметно будут сказываться неравномерные, резкие изменения температуры;

различным действием силы тяжести на отдельные части оптической системы при разных положениях трубы по зенитному расстоянию.

Совокупное действие указанных факторов на боковое смещение визирной оси частично проявляется в изменении величины коллимационной ошибки, определенной по наблюдениям предметов на различных зенитных расстояниях.

Абсолютная величина бокового гnutия значительно меньше вертикального гnutия и, как правило, не превышает нескольких десятых долей секунды дуги.

¹ Поправка Δa_z имеет положительный знак, когда под влиянием неправильностей цапф горизонтальная ось теодолита поворачивается по часовой стрелке, если смотреть на прибор сверху.

Боковое гнутие влияет на измеренное горизонтальное направление пропорционально $\cos \alpha z$, т. е.

$$\Delta N_{\text{б.г}} := \Delta \beta \cos \alpha z. \quad (8.40)$$

Величина и знак $\Delta \beta$ находятся из специальных исследований бокового гнутия с помощью автоколлимационной насадки по методу, разработанному в ЦНИИГАиК [32]. При этом величина поправки находится из исследований, выполненных при двух кругах.

Опыт показывает, что с изменением внешних условий наблюдений, после тряски приборов во время их перевозок, величина бокового гнутия может измениться. Поэтому вводить поправки за боковое гнутие в полевые наблюдения на основании лабораторных исследований не всегда целесообразно.

При точных азимутальных определениях исследование бокового гнутия целесообразно производить на каждом полевом пункте.

Если при исследованиях поправки за боковое гнутие получены достаточно уверенно, но величина их превышает допустимый предел, то принимают меры к устранению причин, порождающих эти погрешности. Для этого проверяют надежность крепления поворачивающей призмы, крепление трубы к флянцу оси, крепление объектива к оправе, работу возвратных пружин подвижной каретки, крепление коробки микрометра, правильность работы наводящих винтов и т. д.

В частности, для исключения погрешностей, вызываемых упругим последствием пружин наводящих винтов, при наблюдениях нужно руководствоваться известным геодезическим правилом: заканчивать наблюдения ввинчиванием.

§ 57. О ВЛИЯНИИ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Характер влияния внешних источников погрешностей на измеряемые горизонтальные направления очень разнообразен. Это влияние наиболее трудно поддается исследованию, учету и исключению из результатов наблюдений.

К основным внешним источникам погрешностей можно отнести:

боковую рефракцию;

температурное воздействие среды и наблюдателя на различные части теодолита;

азимутальные сдвиги столба (столика сигнала), на котором установлен теодолит и др.

1. Боковая рефракция

Под боковой рефракцией понимают азимутальную составляющую общей рефракции, т. е. явления преломления луча света в слоях воздуха различной плотности.

Из теории астрономической рефракции известно, что при параллельных уровнях элементарных слоев атмосферы с возрастающей плотностью к поверхности Земли явление преломления луча света от источника происходит в вертикальной плоскости, и в этом случае уменьшает зенитные расстояния наблюдаемых объектов и не оказывает влияния на азимут направления.

Если же в результате действия местных аномалий на пути луча образуются наклонные преломляющие поверхности элементарных слоев воздуха, то в этом случае возможны боковые отклонения луча от вертикальной плоскости.

Как правило, местные аномалии в распределении плотности слоев атмосферы сопутствуют районам с резкими барическими и температурными градиентами вблизи больших водоемов и болот, по долинам рек, у подножия гор, в местах с резко разнящимся растительным покровом и т. д. Эти аномалии, создаваемые местными условиями, простираются на небольшую высоту над поверхностью Земли, и поэтому боковая рефракция в основном оказывает влияние на измеряемые направления вблизи поверхности Земли, т. е. на больших зенитных расстояниях.

Опытом установлено, что в среднем величина боковой рефракции не превосходит по абсолютному значению $1''$, а при наблюдениях светил на малых зенитных расстояниях она обычно меньше точности наших измерений. Тем не менее, в точных азимутальных способах астрономических определений с этим влиянием нельзя не считаться.

Не зная количественного закона действия боковой рефракции, стремятся ослабить ее влияние путем целесообразной методики наблюдения. Например, для ослабления влияния боковой рефракции:

не рекомендуется наблюдать светила на зенитных расстояниях, превышающих $75-80^\circ$;

при определениях азимута направления на местный предмет производят наблюдения прямого и обратного азимутов. В этом случае боковая рефракция входит в прямой и обратный азимуты с разными знаками и в среднем выводе ослабляется;

для ослабления влияния кратковременных аномалий в распределении плотностей слоев атмосферы стремятся растянуть период наблюдений на пункте на несколько вечеров, производить наблюдения днем и ночью и т. д.

2. Температурное воздействие среды и наблюдателя на различные части теодолита

В результате неравномерного нагревания отдельных частей прибора могут происходить изменения в относительном положении деталей оптической системы трубы, что приводит к изменениям положения визирной оси и возможным ее боковым смещениям. Так, систематическое тепловое воздействие наблюдателя при

производстве наблюдений может выразиться в гнутии (прогибе вниз) окулярного конца оси, которое при наблюдениях звезд на малых зенитных расстояниях может приводить к заметному смещению коллимационной плоскости прибора. Нетрудно подсчитать, что при фокусном расстоянии объектива, равном 0,5 м, линейное смещение окулярного конца оси вниз на 1 мкм даст боковое смещение визирной оси порядка 0,2—0,3".

Бесспорно установленным фактом следует также считать нагревание теплом наблюдателя ближайшей к нему стойки уровня и подставки трубы, что приводит к погрешностям в определении наклона горизонтальной оси и в конечном счете к погрешностям измеряемых горизонтальных направлений на светила. При тепловом расширении латунной стойки уровня ($1,8 \times 10^{-5}$) и при отношении длины стойки к расстоянию между стойками уровня, равном 1 : 2, разность температур обеих стоек в 1° С вызовет наклон оси уровня на 1,8".

В реальности этого явления легко убедиться, если слегка подышать на одну из стоек уровня теодолита. При этом можно заметить, что пузырек уровня медленно переместится на 0,3—0,5 деления к нагретой ножке и лишь через несколько минут вернется в первоначальное положение.

Ослабление влияния теплового воздействия наблюдателя при определении наклона горизонтальной оси в результатах измерения горизонтальных направлений на светила происходит для наблюдений, выполняемых при двух положениях круга.

То же самое можно сказать и в отношении теплового воздействия наблюдателя на подставку трубы, несущую окулярную цапфу. Эти воздействия будут изменять наклон уровня, но из наблюдений при двух положениях прибора в среднем выводе горизонтального направления будет в значительной степени компенсироваться. Для ослабления теплового воздействия среды и наблюдателя на измеряемые горизонтальные направления, кроме указанной выше целесообразной методики наблюдений, необходимо также принимать и другие меры по защите прибора от неравномерного нагревания. Так, прибор необходимо выставлять за 1—2 ч до наблюдений, с тем чтобы он принял температуру окружающей среды, при работе днем обязательно защищать зонтом от теплового излучения Солнца, при работе в павильоне или в астрономической палатке целесообразно «обдывать» прибор с помощью вентилятора.

Как показывает опыт, подобные меры позволяют повышать качество и точность результатов наблюдений.

3. Азимутальные сдвиги столба (столика сигнала)

Азимутальные сдвиги столба могут быть вызваны как кручением самого столба вследствие неравномерного распределения сил напряжения в отдельных его частях, так и азимутальными

сдвигами поверхностных слоев почвы, обусловленных главным образом температурным последствием.

Результаты специальных исследований показывают, что изменение азимута, вызванное кручением столба и азимутальными сдвигами поверхностных слоев почвы, пропорционально первой, а в отдельных случаях и второй степени времени, т. е.

$$a = a_0 + \frac{da}{dt} (T - T_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2a}{dt^2} (T - T_0)^2. \quad (8.41)$$

Естественно, что величина азимутального сдвига, вызванного кручением столба или сигнала, будет зависеть также от материала, из которого они сделаны. Наиболее подверженными кручению являются сложные конструкции геодезических сигналов и деревянные столбы, представляющие собой обрезки свежесрубленных деревьев.

Из отчетов по астрономическим определениям, выполненным в астрономо-геодезической сети, видно, что в некоторых случаях кручение по азимуту триангуляционных сигналов достигает 4—5" за время определения азимута по Полярной одним приемом, т. е. за 20—25 мин.

Сколь-нибудь заметное кручение столбов в течение такого же промежутка времени наблюдалось в единичных случаях. Наименее подвержены кручению столбы, представляющие собой каменную или кирпичную кладку. Специальными исследованиями установлено, что такие столбы за вечер наблюдений не испытывают кручения, величина которого могла бы повлиять на точность определений. Это, конечно, справедливо для нормального состояния грунта и не относится к зыбким болотистым грунтам, а также к грунтам пояса многолетней мерзлоты.

В том случае, когда азимутальные сдвиги прибора, обусловленные кручением столба и сдвигами поверхностных слоев почвы, пропорциональны первой степени времени, их можно исключить, расположив наблюдения симметрично относительно среднего момента времени, необходимого для измерения данной величины.

В случаях, когда расположить таким образом наблюдения нельзя, а также если изменение азимута происходит неравномерно (с ускорением или скачками), как это бывает при резких изменениях температуры, необходимо применять поверительную трубу и исправлять наблюдения соответствующими поправками.

Для случаев явно выраженного «хода» азимута целесообразно вводить в уравнения поправок при обработке наблюдений по методу наименьших квадратов добавочный член $K(T - T_0)$ и определять таким образом азимутальные сдвиги из самих наблюдений.

**§ 58. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ (УГЛА),
ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЛИЯНИЕМ
СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ**

Случайные погрешности наблюдений настолько многочисленны и разнообразны по своей природе, что учесть их все практически невозможно. Знак этих погрешностей случаен, а величина для данных условий и средств измерений не может превзойти определенного предела.

Если систематические погрешности можно исключить из результатов путем целесообразно построенной методики наблюдений или учесть, изучив закон их действия на измеряемую величину, то влияние случайных погрешностей можно только ослабить за счет увеличения числа измерений, а также улучшения условий и средств наблюдений.

Суммарное влияние случайных погрешностей измерений можно представить в виде

$$M_N = \sqrt{[m_i^2]}, \quad (8.42)$$

где m_i — элементарные случайные составляющие общей случайной погрешности.

Так как при априорных подсчетах трудно учесть влияние всех источников случайных погрешностей, то обычно величина M_N , подсчитанная а priori, не совпадает точно с ее значением, полученным из наблюдений.

К основным случайным погрешностям измерения горизонтальных направлений на светила можно отнести:

- погрешность визирования на светило;
- погрешность отсчета по горизонтальному лимбу прибора;
- погрешность в определении наклонности горизонтальной оси прибора;

остаточное случайное влияние неучтенной части систематических погрешностей: бокового гнуптия трубы, боковой рефракции, погрешностей цапф, азимутальных сдвигов всего прибора и т. п.

Рассмотрим влияние перечисленных случайных погрешностей.

1. Влияние случайной погрешности визирования

Для визирования методом наведений вертикальной нитью, когда скорость перемещения светила по направлению, перпендикулярному к нити, мала (положение светила, близкое к элонгации, близполюсные звезды), случайная погрешность визирования остается практически той же, что и при наблюдении неподвижного объекта (4.19), т. е.

$$m_b = \frac{15b^5}{W},$$

где

$$2^s < b^s < 3^s.$$

Рассматривая погрешность визирования как дополнительную составляющую коллимационной ошибки, получим влияние погрешности визирования на измеренное горизонтальное направление для метода наведения по формуле

$$m_{b_N} = \frac{15b^s}{\sin z W \sqrt{k}}, \quad (8.43)$$

где k — число визирований; z — зенитное расстояние наблюдаемого объекта.

При визировании методом наблюдений моментов прохождений светила через вертикальные нити неподвижной по азимуту трубы теодолита средняя квадратическая погрешность момента прохождения может быть представлена формулой (4.23)

$$m_T^2 = a^2 + \frac{m_b^2}{V^2},$$

где $V = \cos \delta \cos q$ — скорость перемещения светила по направлению перпендикулярному к вертикальной нити.

Подставив в (4.23) значения m_b и v , получим окончательно

$$m_T^2 = \frac{1}{k} \left[a^2 + \frac{b^2}{(W \cos \delta \cos q)^2} \right], \quad (8.44)$$

где k — число наблюдаемых прохождений (число нитей или контактов).

Значения величин a и b для азимутальных способов остаются практически теми же, что и для зенитальных способов астрономических определений. В зависимости от метода наблюдений светил эти значения приведены в табл. 10.

Для приближенных расчетов с погрешностью, не превышающей 10% от m_T , значение m_T можно представить формулой

$$m_T = \frac{b}{W \sqrt{k} \cos \delta \cos q}. \quad (8.45)$$

Влияние погрешности момента прохождения светила через вертикальные нити трубы на измеренное горизонтальное направление можно получить на основании формулы скорости изменения азимута светила:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z}.$$

Перейдя от дифференциалов к средним квадратическим погрешностям, получим

$$m_{b_A} = m_{b_N} = \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z} m_T. \quad (8.46)$$

Наблюдение	m_{b_N}
Методом «глаз—ухо»	0,5"
С контактным микрометром	0,3"
Методом наведений (для светил в положении элонгации и для Полярной при $k = 4$)	0,3"

Подставив в (8.46) значение m_T из (8.44), будем иметь

$$m_{b_N} = \frac{15}{\sin z \sqrt{k}} \sqrt{a^2 (\cos \delta \cos q)^2 + \frac{b^2}{W^2}} \quad (8.47)$$

или приближенно

$$m_{b_N} = \frac{15b}{W \sqrt{k} \sin z}. \quad (8.48)$$

Из формул (8.43) и (8.48) следует, что влияние погрешностей визирования на измеряемые горизонтальные направления возрастает с уменьшением зенитных расстояний светил пропорционально $\operatorname{cosec} z$ и практически не зависит от азимутов светил.

Принимая для 2-секундного астрономического теодолита $W = 50\times$, $k = 9$, $b = 4,7^s$ — для метода «глаз—ухо», $b = 2,8^s$ — для наблюдений с контактным микрометром и $b = 2,0^s$ — для метода наведений (при $k = 4$), получим на основании (8.43) и (8.48) следующие погрешности измеренных горизонтальных направлений, обусловленные влиянием погрешностей визирования (табл. 54).

2. Погрешность отсчета горизонтального круга

Эта погрешность полностью входит в погрешность измеренного горизонтального направления. Ее можно представить как результат совокупного влияния погрешности наведения биссектора микроскопа-микрометра на штрих лимба, отсчетов по микроскопам-микрометрам, а также случайных и систематических погрешностей диаметров лимба. Полагая, что отсчет горизонтального лимба составлен как среднее из отсчетов по двум микроскопам-микрометрам с наведением каждый раз на младший и старший штрих, можно написать

$$m_L^2 = \frac{m_1^2}{4} + \frac{m_2^2}{4} + \frac{m_3^2}{2}, \quad (8.49)$$

где m_1 — средняя квадратическая погрешность одного наведения биссектора микроскопа-микрометра на штрих лимба и отсчета по

микроскопу; m_2 — случайная погрешность диаметра лимба; m_3 — средняя квадратическая величина систематической погрешности диаметра лимба.

По материалам многократных исследований для двухсекундных астрономических теодолитов можно положить:

$$m_1 = 0,35'' \approx 0,4'',$$

$$m_2 = 0,2'';$$

$$m_3 = 0,6''.$$

Подставляя эти значения в формулу (8.49), получим

$$m_L = 0,5''. \quad (8.50)$$

Для ослабления влияния случайных и систематических погрешностей диаметров лимба при измерении горизонтальных направлений целесообразно производить перестановку горизонтального круга.

Необходимо заметить, что для современных оптических теодолитов (например, Вильд Т-4, ДКМ-3А и др.) значения случайных и систематических погрешностей диаметров лимба сравнительно малы. Их совместное влияние на отсчет горизонтального лимба не превосходит $0,15$ — $0,20''$, а средняя квадратическая погрешность отсчета лимба с помощью оптического микрометра при двукратном совмещении штрихов равна

$$m_L = 0,3''. \quad (8.50')$$

3. Погрешность в определении наклона горизонтальной оси

Погрешность обычно подсчитывается по экспериментальной формуле Рейнгерца

$$m_i = 0,20'' \sqrt{\tau}, \quad (8.50'')$$

где τ — цена деления накладного на горизонтальную ось уровня; m_i — средняя квадратическая погрешность в определении положения пузырька уровня по отсчетам его концов.

При работе астрономическим теодолитом наклон оси обычно определяется из двух пар отсчетов, получаемых при двух положениях уровня на горизонтальной оси по формуле (8.10). С учетом этого формула Рейнгерца примет вид

$$m_i = \frac{0,20''}{\sqrt{2}} \sqrt{\tau} = 0,10'' \sqrt{2\tau}. \quad (8.51)$$

Влияние погрешности за наклон на измеренное горизонтальное направление будет

$$m_{N_i} = 0,10'' \sqrt{2\tau} \operatorname{ctg} z. \quad (8.52)$$

При наблюдениях светил на малых зенитных расстояниях это влияние будет весьма существенным.

Следует заметить, что формула Рейнгерца по своему существу дает погрешность за определение наклона оси уровня, а не горизонтальной оси прибора, что, конечно, не одно и то же.

Погрешность за наклон горизонтальной оси зависит от многих факторов, среди которых можно назвать: качество формы цапф горизонтальной оси, неравенство диаметров цапф, качество шлифовки внутренней поверхности ампулы, точность принятой цены деления уровня, температурное воздействие среды и наблюдателя на отдельные части теодолита, состояние столба или столика сигнала, на котором установлен теодолит и т. д.

Вполне понятно, что формула Рейнгерца, основанная на результатах лабораторного исследования, не может отразить всех вышеперечисленных факторов и поэтому дает заведомо завышенную точность. Влияние некоторых из этих факторов было рассмотрено выше.

В частности, влияние погрешностей цапф учитывается в результатах наблюдений на основании исследований их формы; влияние неравенства диаметров цапф исключается из наблюдений при двух кругах; температурное влияние среды и наблюдателя на определение наклонности частично ослабляется переключкой уровня на оси и наблюдениями, выполненными при двух кругах. Что же касается дефектов в шлифовке внутренней поверхности ампулы, различной ее кривизны на разных участках рабочей части шкалы и погрешности вывода средней цены деления уровня, то специальными экспериментальными исследованиями установлено, что совокупное их влияние не превосходит 5% от цены деления уровня.

С учетом этого погрешность определения за наклон горизонтальной оси при двух положениях уровня на оси будет

$$m_i^2 = \frac{b^2}{4} m_\tau^2 + (0,10'' \sqrt{2\tau})^2, \quad (8.53)$$

где $m_\tau = 0,05 \tau$; b — наклон оси уровня в полуделениях.

Полагая для 2-секундного астрономического теодолита $\tau = 2,5''$, $b = 5^{0/2}$, получим

$$m_i = 0,36''. \quad (8.54)$$

Погрешность измерения горизонтального направления 2-секундным астрономическим теодолитом, обусловленная влиянием погрешности наклона горизонтальной оси, будет

$$m_{N_i} = 0,36'' \operatorname{ctg} z. \quad (8.55)$$

4. Суммарная случайная погрешность измерения горизонтального направления

Обусловленная влиянием погрешностей визирования, отсчетов по горизонтальному кругу и определения наклона горизонтальной оси суммарная погрешность на основании формул (8.42), (8.48), (8.50) и (8.55), будет

$$M_N^2 = \left(\frac{15b^s}{\sin z W \sqrt{k}} \right)^2 + m_L^2 + m_i^2 \operatorname{ctg}^2 z \quad (8.56)$$

или

$$M_N^2 = \frac{1}{\sin^2 z} \left[\left(\frac{15b^s}{W \sqrt{k}} \right)^2 + m_L^2 \sin^2 z + m_i^2 \cos^2 z \right]. \quad (8.57)$$

Полагая на основании (8.50) и (8.54) $m_L \approx m_i$, получим

$$M_N^2 = \frac{1}{\sin^2 z} \left[\left(\frac{15b^s}{W \sqrt{k}} \right)^2 + m_L^2 \right]. \quad (8.58)$$

Таким образом, из формулы (8.58) следует, что случайная погрешность измерения горизонтального направления возрастает с уменьшением зенитных расстояний светил пропорционально $\operatorname{cosec} z$.

Ожидаемое значение случайной погрешности измерения горизонтального направления одним приемом, в зависимости от метода наблюдений, представлено в табл. 55.

Средняя квадратическая погрешность измерения горизонтального угла между светилом и местным предметом будет

$$M_Q^2 = M_N^2 + M_M^2. \quad (8.59)$$

Полагая для наблюдений местного предмета в горизонте

$$M_M^2 = \left(\frac{15b^s}{W \sqrt{k}} \right)^2 + m_L^2, \quad (8.60)$$

получим

$$M_Q^2 = (1 + \operatorname{cosec}^2 z) \left[\left(\frac{15b^s}{W \sqrt{k}} \right)^2 + m_L^2 \right]. \quad (8.61)$$

Т а б л и ц а 55

Наблюдение	M_N	
	Теодолит АУ 2"/10"	Теодолит У5
Методом «глаз—ухо» ($b = 4,5^s$)	0,8" $\operatorname{cosec} z$	1,3" $\operatorname{cosec} z$
Методом «глаз—клавиша» ($b = 4,2^s$)	0,7" $\operatorname{cosec} z$	1,2" $\operatorname{cosec} z$
С контактным микрометром ($b = 2,8^s$)	0,6" $\operatorname{cosec} z$	1,1" $\operatorname{cosec} z$
Методом наведений (для светил в положении элонгации и для Полярной звезды $b = 2,5^s$)	0,6" $\operatorname{cosec} z$	1,1" $\operatorname{cosec} z$

Наблюдение	M _Q	
	Теодолит АУ 2"/10"	Теодолит У5
Методом «глаз—ухо»	$0,8'' \sqrt{1 + \operatorname{cosec}^2 z}$	$1,3'' \sqrt{1 + \operatorname{cosec}^2 z}$
Методом «глаз—клавиша»	$0,7'' \sqrt{1 + \operatorname{cosec}^2 z}$	$1,2'' \sqrt{1 + \operatorname{cosec}^2 z}$
С контактным микрометром	$0,6'' \sqrt{1 + \operatorname{cosec}^2 z}$	$1,0'' \sqrt{1 + \operatorname{cosec}^2 z}$
Методом наведений (для светил в элонгации и для Полярной звезды)	$0,6'' \sqrt{1 + \operatorname{cosec}^2 z}$	$1,0'' \sqrt{1 + \operatorname{cosec}^2 z}$

{ Численное значение средних квадратических погрешностей измерения горизонтального угла по аналогии с табл. 55 представлено в табл. 56.

На практике, вследствие неучтенного остаточного влияния боковой рефракции, бокового гнуптия трубы, погрешностей цапф, систематических погрешностей диаметров круга, погрешностей определения наклона горизонтальной оси, азимутальных сдвигов теодолита и других погрешностей, величины средних квадратических погрешностей измерений горизонтального направления или горизонтального угла оказываются несколько больше их ожидаемых значений. Поэтому для более объективной оценки точности целесообразнее пользоваться значением погрешности единицы веса μ , полученным из опыта, в результате уравнивания больших рядов наблюдений.

ГЛАВА 9

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ АЗИМУТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

§ 59. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В основу теории азимутальных способов астрономических определений положено уже известное нам уравнение связи (8) между азимутом направления на светило A , широтой φ и поправкой хронометра u

$$\operatorname{ctg} A = \sin \varphi \operatorname{ctg} t - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t,$$

где

$$t = T_H + u - \alpha.$$

Так как в геодезии и других прикладных науках, связанных с ней, азимуты направлений отсчитываются от точки Севера, то в целях согласования с указанным положением все выводы в дальнейшем мы будем производить, отсчитывая азимут направления от точки Севера по ходу движения часовой стрелки, от 0 до 360° .

С помощью уравнений связи (8) можно решать задачи как совместного определения широты, поправки хронометра и направления меридиана, так и их раздельного определения.

Наиболее общей задачей азимутальных способов является задача совместного определения широты, поправки хронометра и направления меридиана по наблюдениям азимутов светил в различных вертикалах и на различных зенитных расстояниях.

При постановке общей задачи все три искомого элемента — широта, поправка хронометра и направление меридиана — предполагаются неизвестными; на выбор звезд для совместного определения указанных элементов не накладываются какие-либо ограничивающие условия, кроме их удовлетворительной видимости. Условия наивыгоднейшего выбора светил при совместном или раздельном определении искомого величин определяются в результате решения общей задачи. При этом различные способы как совместного, так и раздельного определения широты, времени и направления меридиана должны, вообще говоря, вытекать из решения общей задачи как отдельные частные случаи.

Принципиально решение задачи совместного определения широты, времени и направления меридиана из азимутальных наблюдений светил в различных вертикалах может быть получено не менее чем из трех уравнений вида (8), т. е. по данным наблюдений по крайней мере трех звезд.

Для осуществления такого решения, выразив азимуты светил в функции измеренных направлений на светила, а соответствующие им часовые углы — в функции наблюдаемых показаний хронометра, будем иметь:

$$A'_1 = N'_1 - M_N, \quad A'_2 = N'_2 - M_N, \quad A'_3 = N'_3 - M_N, \quad (9.1)$$

где N'_1, N'_2, N'_3 — измеренные значения направлений на светила; M_N — место Севера на горизонтальном лимбе прибора

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= T_1 + u + \omega(T_1 - X) - \alpha_1; \\ t_2 &= T_2 + u + \omega(T_2 - X) - \alpha_2; \\ t_3 &= T_3 + u + \omega(T_3 - X) - \alpha_3, \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

где T_1, T_2, T_3 — показания хронометра, соответствующие моментам наблюдения звезд; X — момент по хронометру, для которого определяется поправка u ; ω — часовой ход хронометра.

Положив

$$\left. \begin{aligned} k' &= t_2 - t_1 = (T_2 - T_1) + \omega(T_2 - T_1) - (\alpha_2 - \alpha_1); \\ k'' &= t_3 - t_1 = (T_3 - T_1) + \omega(T_3 - T_1) - (\alpha_3 - \alpha_1), \end{aligned} \right\} \quad (9.3)$$

получим

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= t_1; \\ t_2 &= t_1 + k'; \\ t_3 &= t_1 + k''. \end{aligned} \right\} \quad (9.4)$$

На основании уравнения связи (8), учитывая (9.1), (9.2), (9.3) и (9.4), для каждой из трех наблюдаемых звезд будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg}(N'_1 - M_N) &= \sin \varphi \operatorname{ctg} t_1 - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_1 \operatorname{cosec} t_1; \\ \operatorname{ctg}(N'_2 - M_N) &= \sin \varphi \operatorname{ctg}(t_1 + k') - \\ &\quad - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_2 \operatorname{cosec}(t_1 + k'); \\ \operatorname{ctg}(N'_3 - M_N) &= \sin \varphi \operatorname{ctg}(t_1 + k'') - \\ &\quad - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_3 \operatorname{cosec}(t_1 + k''). \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

Из решения системы уравнений (9.5) можем найти φ, t_1 и M_N , а далее, пользуясь выражением (9.2) для t_1 , найдем u . Решение системы уравнений (9.5) в конечном виде весьма сложно и не может иметь практического значения. Задача значительно упрощается, если, пользуясь предварительными значениями φ_0, u_0 и M_N^0 , перейти к ее решению с помощью дифференциальных формул, вытекающих из уравнения (8).

Полагая

$$t_i = T_i + \omega (T_i - X) + u_0 + \Delta u - \alpha_i = t_{0_i} + \Delta u, \quad (9.6)$$

где

$$t_{0_i} = T_i + u_0 + \omega (T_i - X) - \alpha_i$$

и

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta \varphi,$$

разложим выражение для A , представленное формулой (8), в ряд Тейлора по степеням $\Delta \varphi$ и Δu .

В практике астрономических определений значения $\Delta \varphi$ и Δu могут быть приняты весьма малыми. Поэтому при разложении в ряд достаточно для практических целей ограничиться членами, содержащими $\Delta \varphi$ и Δu в первой степени, т. е.

$$A_i = A_{0_i} + \left(\frac{\partial A}{\partial \varphi} \right)_i \Delta \varphi + 15 \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_i \Delta u. \quad (9.7)$$

В выражении (9.7) имеем

$$A_{0_i} = \text{arcctg} (\sin \varphi_0 \text{ctg } t_{0_i} - \cos \varphi_0 \text{tg } \delta_i \text{cosec } t_{0_i}), \quad (9.8)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial \varphi} \right)_i = \sin A_i \text{ctg } z_i, \quad (9.9)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_i = \frac{\cos \delta_i \cos q_i}{\sin z_i} = \sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \text{ctg } z_i \cos A_{0_i}.$$

На основании рис. 88 имеем следующую зависимость между точными (уравненными) значениями A , M_N и N_i

$$A_i + M_N = N_i. \quad (9.10)$$

Из наблюдений нам известны измеренное значение горизонтального направления на светило N'_i и показание хронометра в момент наблюдения светила T_{H_i} . Кроме того, известны предварительные координаты пункта φ_0 и λ_0 .

Из приемов радиосигналов времени можем определить с принятой длиной пункта λ_0 предварительное значение поправки хронометра u_0 и ход хронометра ω .

Пользуясь полученными значениями φ_0 и λ_0 , а также наблюдаемым моментом T_{H_i} , можем вычислить предварительные значения часового угла t_{0_i} и азимута светила A_{0_i} по формулам (9.6) и (9.8) соответственно.

Со счислимым азимутом светила A_{0_i} предварительное значение места Севера M_N° на горизонтальном круге вычислится по формуле

$$M_N^\circ = N'_i - A_{0_i}. \quad (9.11)$$

Уравненные значения N_i , A_i и M_N в функции измеренных или вычисленных предварительных значений этих же величин можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} N_i &= N'_i + v_i; \\ A_i &= A_{0i} + \Delta A_i; \\ M_N &= M_N^{\circ} + \Delta M_N, \end{aligned} \right\} \quad (9.12)$$

где v_i — поправка измеренного направления на светило N'_i ; $\Delta A_i = \left(\frac{\partial A}{\partial \varphi}\right)_i \Delta \varphi + \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_i \Delta u$ — поправка счислимого азимута A_{0i} за неверно принятые значения φ_0 и u_0 ; ΔM_N — поправка предварительного значения места Севера M_N° .

Подставив выражения (9.12) в (9.10), получим уравнение поправок для измеренного горизонтального направления

$$\Delta M_N + \Delta A_i + l_i = v_i, \quad (9.13)$$

в котором

$$l_i = (A_{0i} + \sum t + M_N^{\circ}) - N'_i. \quad (9.14)$$

В выражении (9.14) $\sum t$ — сумма методических поправок вычисленного азимута светила, которые будут рассмотрены ниже.

Учитывая выражения (9.7)—(9.9) для каждого измеренного горизонтального направления на светило будем иметь окончательное уравнение поправок

$$\begin{aligned} &\Delta M_N + \sin A_i \operatorname{ctg} z_i \Delta \varphi + \\ &+ 15 (\sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} z_i \cos A_i) \Delta u + l_i = v_i. \end{aligned} \quad (9.15)$$

В практике астрономических определений часто встает задача определения азимута направления на местный предмет. Для этой цели, кроме измерения направления N'_i на светило, измеряют также горизонтальное направление на местный предмет M'_i (см. рис. 83). Очевидно, астрономический азимут направления на местный предмет может быть определен по одной из следующих формул:

$$a = M_i - M_N \quad (9.16)$$

или

$$a = A_i + Q_i, \quad (9.17)$$

где $Q_i = M'_i - N'_i$ — измеренный угол между светилом и местным предметом.

Если в качестве необходимого неизвестного вместо M_N принять азимут направления на местный предмет

$$a = a_0 + \Delta a, \quad (9.18)$$

где a_0 — предварительное значение азимута; Δa — поправка предварительного значения азимута направления на местный предмет;

то в этом случае уравнение поправок для измеренного горизонтального угла примет вид

$$\begin{aligned} \Delta\alpha - \sin A_i \operatorname{ctg} z_i \Delta\varphi - \\ - 15 (\sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} z_i \cos A_i) \Delta u + l'_i = v'_i, \end{aligned} \quad (9.19)$$

где

$$l'_i = [a_0 - (A_{0_i} + \sum i)] - Q'_i,$$

v'_i — поправка измеренного угла Q'_i .

Если наблюдения серии звезд располагать в промежутке между двумя приемами радиосигналов точного времени, то в результате совместной обработки данных наблюдений и приема радиосигналов возможно непосредственно получить значения географических координат (широты и долготы) места наблюдений, азимута направления на местный предмет (или M_N на горизонтальном круге).

Уравнения поправок для измеренного горизонтального направления или горизонтального угла примут в этом случае соответственно вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_N + \sin A_{0_i} \operatorname{ctg} z_i \Delta\varphi + \\ + 15 (\sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} z_i \cos A_{0_i}) \Delta\lambda + l_i = v_i; \\ \Delta\alpha - \sin A_{0_i} \operatorname{ctg} z_i \Delta\varphi - \\ - 15 (\sin \varphi_0 - \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} z_i \cos A_{0_i}) \Delta\lambda + l'_i = v'_i. \end{aligned} \right\} \quad (9.20)$$

В дальнейшем в зависимости от решаемой задачи будем пользоваться уравнениями как (9.15) и (9.19), так и (9.20), имея в виду, что они идентичны. В полученных линейных уравнениях поправок по-прежнему имеем три независимых параметрических неизвестных: ΔM_N ($\Delta\alpha$), $\Delta\varphi$ и Δu ($\Delta\lambda$). Для их совместного определения необходимо произвести наблюдения по крайней мере трех звезд. Если произведены наблюдения n звезд в различных вертикалах, причем $n > 3$, то для определения трех неизвестных будем иметь избыточное число $n - 3$ уравнений поправок. Решая систему из n уравнений поправок по методу наименьших квадратов, найдем вероятнейшие значения определяемых величин и можем оценить точность их вывода. Таков основной путь решения общей задачи азимутальных способов астрономических определений.

§ 60. ВЕС УРАВНЕНИЯ ПОПРАВК

Вес уравнения поправок определяется известной формулой метода наименьших квадратов

$$P_i = \frac{\mu^2}{m^2 l_i}, \quad (9.21)$$

где μ — средняя квадратическая погрешность единицы веса, m_{l_i} — средняя квадратическая погрешность измерения, численно равная погрешности свободного члена уравнения поправок.

Для определения m_{l_i} необходимо продифференцировать выражение (9.14) свободного члена, а затем от истинной погрешности dl_i перейти к средней квадратической погрешности m_{l_i} . Пренебрегая по малости влиянием погрешностей экваториальных координат светила $d\alpha_i$ и $d\delta_i$, в результате указанных операций получим

$$m_{l_i}^2 = \left(15 \frac{\cos \delta_i \cos q_i}{\sin^2 z_i} \right)^2 m_{T_i}^2 + m_{L_i}^2 + m_{b_i}^2 \operatorname{ctg}^2 z_i, \quad (9.22)$$

где $m_{T_i}^2$ — погрешность оценки момента прохождения светила через вертикальные нити трубы (погрешность момента контактирования при наблюдениях с контактным микрометром), m_{L_i} — погрешность отсчета по горизонтальному лимбу, m_{b_i} — погрешность определения наклона горизонтальной оси.

Значение m_{T_i} определяется известной приближенной формулой

$$m_{T_i} = \frac{b}{W \sqrt{k}} \sec \delta_i \sec q_i, \quad (9.23)$$

где b — постоянная, зависящая от метода наблюдений, W — увеличение трубы, k — число нитей (контактов), на которых произведено наблюдение светила, $\cos \delta_i \cos q_i$ — скорость светила по направлению, перпендикулярному к вертикальной нити.

Подставив значение m_{T_i} в выражение (9.22), получим

$$m_{l_i}^2 = \frac{1}{\sin^2 z_i} \left(\frac{15b}{W \sqrt{k}} \right)^2 + m_{L_i}^2 + \frac{m_{b_i}^2 \cos^2 z_i}{\sin^2 z_i}. \quad (9.24)$$

Примем за погрешность единицы веса погрешность наблюдения светила в горизонте ($z = 90^\circ$). Для наблюдений светила в горизонте будем иметь

$$\mu^2 = \left(\frac{15b}{W \sqrt{k}} \right)^2 + m_{L_i}^2. \quad (9.25)$$

После подстановки выражений (9.24) и (9.25) в формулу веса (9.21) получим

$$P_i = \frac{\left(\frac{15b}{W \sqrt{k}} \right)^2 + m_{L_i}^2}{\frac{1}{\sin^2 z} \left[\left(\frac{15b}{W \sqrt{k}} \right)^2 + m_{L_i}^2 \sin^2 z_i z_i + m_{b_i}^2 \cos^2 z_i \right]}. \quad (9.26)$$

При наблюдениях современным астрономическим теодолитом с достаточным основанием можно принять, что погрешность отсчета по лимбу равна погрешности определения наклона гори-

z°	P_N	P_Q	z°	P_N	P_Q
0°	0	0	60	0,75	0,85
15	0,07	0,12	75	0,94	0,97
30	0,25	0,40	90	1,00	1,00
45	0,50	0,66			

зонтальной оси, т. е. $m_{L_i} \approx m_{b_i}$. В этом случае формула для веса уравнения поправок будет иметь простой вид

$$P_i = \sin^2 z_i. \quad (9.27)$$

Следовательно, вес уравнения поправок для измеренного горизонтального направления зависит только от зенитного расстояния светила и не зависит от азимута вертикала, в котором наблюдается светило; вес будет тем больше, чем больше зенитное расстояние наблюдаемого светила.

Аналогичным путем нетрудно получить выражение веса для измеренного горизонтального угла Q_i между светилом и местным предметом.

При условии $z_\Delta = 90^\circ$ это выражение имеет вид

$$P_{Q_i} = \frac{\mu_Q^2}{M_Q^2} = \frac{(1+1) \left[\left(\frac{15b}{W\sqrt{k}} \right)^2 + m_{L_i}^2 \right]}{(1 + \operatorname{cosec}^2 z_i) \left[\left(\frac{15b}{W\sqrt{k}} \right)^2 + m_{L_i}^2 \right]} = \frac{2}{1 + \operatorname{cosec}^2 z_i}. \quad (9.28)$$

В зависимости от зенитного расстояния наблюдаемого светила численные значения весов для измеренного горизонтального направления и угла, подсчитанные по формулам (9.27) и (9.28), представлены в табл. 57.

Из табл. 57 видно, что веса уравнений поправок для измеренных горизонтальных направлений и углов практически одинаковы и вполне удовлетворительно определяются формулой (9.27).

§ 61. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ПОПРАВОК ДЛЯ АЗИМУТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ

Для выяснения геометрической сущности уравнения поправок (9.20) напомним его в виде:

$$\Delta a - 15\Delta\lambda \sin \varphi_0 - \sin A_{0_i} \operatorname{ctg} z_i \Delta\varphi + 15\Delta\lambda \cos \varphi_0 \operatorname{ctg} z_i \cos A_{0_i} + [a_0 - (A'_{0_i} + \Sigma_i)] - Q'_i = v'_i \quad (9.20')$$

и рассмотрим составляющие его элементы.

— поправка измеренного горизонтального направления на светило за переход от астрономического зенита к условному; $Q'_i + v'_i = Q_i$ — уравненное значение горизонтального угла; $Q_{0_i} = Q_i - \Delta N_i$ — горизонтальный угол Q_i , исправленный поправкой ΔN_i направления на светило;

$$A_i = a_0 + \Delta a - (Q'_i + v'_i) = a - Q_i \quad (9.33)$$

— астрономический азимут светила.

С учетом обозначения (9.33) уравнение (9.31) примет вид

$$A_{0_i} = A_i - 15 (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi + \frac{y \cos A_i - x \sin A_i}{\operatorname{tg} z_i}, \quad (9.34)$$

где

$$A_{0_i} = A'_{0_i} + \sum l_i.$$

На основании выражения (9.34) можно сделать вывод: уравнение поправок (9.20) азимутальных способов есть не что иное как уравнение связи между условным и астрономическим азимутами одного и того же направления. Уравнение (9.34) справедливо для любого направления, в том числе и для направления на земной предмет. В этом случае в принятых на рис. 88 обозначениях оно запишется в виде

$$a' = a - 15 (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi + \frac{y \cos a - x \sin a}{\operatorname{tg} z_{з.п}}, \quad (9.35)$$

где a' — условный азимут направления на земной предмет (отнесенный к условному зениту Z_0); $z_{з.п}$ — зенитное расстояние направления на земной предмет; $\Delta M_i = \frac{y \cos a - x \sin a}{\operatorname{tg} z_{з.п}}$ — поправка измеренного горизонтального направления на местный предмет M_i за переход от истинного зенита к условному.

По малости последнего слагаемого выражения (9.35) можно записать¹

$$a' = a - 15 (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi = a_0 + \Delta a - 15 (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi = a_0 + \Delta a',$$

где

$$\Delta a' = \Delta a - 15 (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi. \quad (9.36)$$

С учетом равенства (9.36) уравнение (9.31) будет иметь вид

$$\Delta a' - \sin A_i \operatorname{ctg} z_i x + \cos A_i \operatorname{ctg} z_i y + l_i = v'_i \quad (9.37)$$

с весом $P_i = \sin^2 z_i$.

¹ Поправка $\Delta M_i = \frac{y \cos a - x \sin a}{\operatorname{tg} z_{з.п}}$ для направления на земной предмет при малых значениях x и y пренебрегаемо мала. Полагая $x = y = 10''$ и $z_{з.п} = 90^\circ \pm 30'$, получим $\Delta M_i \leq 0,08''$.

Обозначив коэффициенты

$$\left. \begin{aligned} -\sin A_i \operatorname{ctg} z_i &= b_i; \\ \cos A_i \operatorname{ctg} z_i &= c_i, \end{aligned} \right\} \quad (9.38)$$

получим уравнение поправок для каждого измеренного горизонтального угла Q'_i в окончательном виде

$$\Delta a' + b_i x + c_i y + l_i = v'_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i, \quad (9.39)$$

$$l_i = [a_0 - (A'_{0_i} + \sum_i)] - Q'_i. \quad (9.39')$$

Путем аналогичных преобразований выражения (9.15) получим уравнение поправок для измеренного горизонтального направления на светило в виде

$$\Delta M'_N - b_i x - c_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i, \quad (9.40)$$

где $\Delta M'_N = \Delta M_N - 15 (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi$ — условная поправка места Севера,

$$l_i = (A'_{0_i} + \sum_i + M'_N) - N'_i.$$

Таким образом, при вычислениях с условными координатами пункта φ_0 и λ_0 определяемыми параметрами в уравнениях поправок являются условный азимут $a' = a_0 + \Delta a'$ направления на местный предмет (условное место Севера $M'_N = M_N + \Delta M'_N$) и условные составляющие уклонения отвесной линии x и y . Значения астрономических координат пункта и астрономического азимута направления на местный предмет найдутся по уравненным значениям неизвестных из равенств:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 + x; \\ \lambda &= \lambda_0 + \Delta \lambda; \\ a &= a_0 + \Delta a, \end{aligned} \right\} \quad (9.41)$$

где

$$\Delta \lambda = \frac{y}{15} \sec \varphi; \quad \Delta a = \Delta a + 15 \Delta \lambda \sin \varphi = \Delta a' + y \operatorname{tg} \varphi. \quad (9.42)$$

Астрономические наблюдения на пунктах геодезической сети обычно производят с целью определения геодезического азимута направления на местный предмет и составляющих уклонения отвесной линии от нормали к принятому референц-эллипсоиду.

Если при вычислениях вместо условных координат φ_0 и λ_0 принять геодезические координаты пункта B и L , то тем самым наши наблюдения с помощью уравнений вида (9.39) или (9.40) будут автоматически редуцированы к геодезическому зениту, и из обработки наблюдений получим значения геодезического азимута направления на местный предмет и астрономо-геодезических составляющих уклонения отвесной линии.

Действительно, обозначив

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \varphi - B; \\ \eta &= 15(\lambda - L) \cos \varphi, \\ a_r &= a_0 + \Delta a_r, \end{aligned} \right\} \quad (9.43)$$

где

$$\Delta a_r = \Delta a - 15(\lambda - L) \sin \varphi, \quad (9.44)$$

на основании уравнения (9.39) получим для каждого наблюдаемого светила уравнение поправок вида

$$\Delta a_r + b_i \xi + c_i \eta + l_i = v'_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i, \quad (9.45)$$

где

$$l_i = [a_0 - (A_{r_i} + \sum_i)] - Q'_i, \quad (9.45')$$

A_{r_i} — азимут светила, вычисленный с геодезическими координатами B и L по формуле

$$\text{ctg } A_{r_i} = \sin B \text{ ctg } t_{r_i} - \cos B \text{ tg } \delta_i \text{ cosec } t_{r_i}, \quad (9.46)$$

в которой

$$t_{r_i} = T_{H_i} + u_r + \omega(T_{H_i} - X) - \alpha_i, \quad (9.47)$$

u_r — поправка хронометра в момент X , получаемая из приема радиосигналов времени с геодезической долготой пункта L .

Выражение (9.35) в этом случае примет вид общеизвестного уравнения Лапласа

$$a_r = a - 15(\lambda - L) \sin \varphi + \frac{\eta \cos a - \xi \sin a}{\text{tg } z_{3.п}}. \quad (9.48)$$

Таким образом, уравнение Лапласа (9.48) является частным случаем наиболее общего уравнения (9.35), представляющего собой зависимость между условным и астрономическим азимутами любого направления. На основании уравнений (9.35) и (9.48) можно установить зависимость между геодезическим и условным азимутами одного и того же направления.

Для этого достаточно подставить в уравнение (9.48) вместо a его значение из (9.35). В результате такой подстановки будем иметь

$$\begin{aligned} a_r &= a' + 15(\lambda - \lambda_0) \sin \varphi - 15(\lambda - L) \sin \varphi + \\ &+ \frac{(\eta - y) \cos a - (\xi - x) \sin a}{\text{tg } z_{3.п}}. \end{aligned}$$

После простых преобразований, заменив

$$\left. \begin{aligned} \eta_0 &= \eta - y = 15(\lambda_0 - L) \cos \varphi; \\ \xi_0 &= \xi - x = \varphi_0 - B, \end{aligned} \right\} \quad (9.49)$$

получим окончательно

$$a_r = a' - 15(\lambda_0 - L) \sin \varphi + \frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} z_{3.n}}. \quad (9.50)$$

В уравнении (9.50) ξ_0 и η_0 — величины малые, так как условные координаты пункта φ_0 и λ_0 можно выбрать достаточно близкими к геодезическим координатам пункта B и L , пользуясь, например, схемой или картой с проектом развиваемой сети. Значение же $\operatorname{tg} z_{3.n}$ всегда велико. Поэтому практически влиянием последнего члена в уравнении (9.50) можно пренебречь по малости.

Из уравнения (9.50) следует важный вывод: для определения геодезического азимута направления на местный предмет не требуется знать ни точного значения астрономического азимута a этого направления, ни точных значений астрономических координат пункта φ и λ .

Таким образом, если при обработке азимутальных наблюдений светил пользоваться условными координатами пункта φ_0 и λ_0 , то в результате совместного решения n уравнений поправок ($n \geq 3$) вида (9.39) или (9.40) по методу наименьших квадратов получим условный азимут направления a' (M'_N) и условные составляющие уклонения отвесной линии x и y .

Далее, по формуле (9.50) вычисляют геодезический азимут направления на местный предмет, а по формулам

$$\left. \begin{aligned} \xi &= x + (\varphi_0 - B); \\ \eta &= y + 15(\lambda_0 - L) \cos \varphi_0, \end{aligned} \right\} \quad (9.51)$$

вытекающим из выражений (9.49), вычисляют астрономо-геодезические составляющие уклонения отвесной линии. В случае необходимости по формулам (9.41) можно вычислить астрономические координаты пункта φ и λ и астрономический азимут a . Если же при обработке азимутальных наблюдений n светил вместо φ_0 и λ_0 пользоваться геодезическими координатами пункта B и L , то геодезический азимут направления a_r и астрономо-геодезические составляющие уклонения отвесной линии ξ и η можно получить путем совместного решения n уравнений вида (9.45). В случае необходимости по этим величинам на основании обозначений (9.43) и (9.44) получим астрономические координаты пункта и астрономический азимут направления.

§ 62. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПОПРАВОК. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ

Для решения общей задачи азимутальных способов с условными координатами пункта φ_0 и λ_0 будем иметь n уравнений поправок вида (9.39), по числу наблюдаемых светил в произвольных азимутах и на произвольных зенитных расстояниях. Система нор-

мальных уравнений, соответствующая n уравнениям поправок, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} [P] \Delta a' + [Pb] x + [Pc] y + [Pl] &= 0; \\ [Pb] \Delta a' + [Pbb] x + [Pbc] y + [Pbl] &= 0; \\ [Pc] \Delta a' + [Pbc] x + [Pcc] y + [Pcl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.52)$$

Численные значения неизвестных определяются на основании стандартных формул:

$$\Delta a' = \frac{\Delta a'}{\Delta}; \quad x = \frac{\Delta_x}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta_y}{\Delta}, \quad (9.53)$$

где Δ — определитель системы нормальных уравнений, $\Delta_{a'}$, Δ_x , Δ_y — определители, полученные путем замены в определителе Δ коэффициентов при соответствующем неизвестном свободными членами нормальных уравнений, взятыми с обратными знаками.

Оценка точности производится по известным формулам метода наименьших квадратов:

средняя квадратическая погрешность единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-3}}; \quad (9.54)$$

средние квадратические погрешности уравненных значений неизвестных

$$m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{P_{a'}}}; \quad m_x = \frac{\mu}{\sqrt{P_x}}; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}}. \quad (9.55)$$

При решении системы нормальных уравнений с помощью определителей значение $[Pv^2]$ находится по формуле

$$[Pv^2] = [Pl] + [Pl] \Delta a' + [Pbl] x + [Pcl] y \quad (9.56)$$

и контролируется путем вычисления v и $[Pv^2]$ из уравнений поправок.

Веса уравненных значений определяемых величин находятся по стандартным формулам

$$P_{a'} = \frac{\Delta}{\Delta_{11}}; \quad P_x = \frac{\Delta}{\Delta_{22}}; \quad P_y = \frac{\Delta}{\Delta_{33}}, \quad (9.57)$$

где Δ_{11} , Δ_{22} , Δ_{33} — алгебраические дополнения, вычисляемые для квадратичных элементов определителя Δ :

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} [Pbb] & [Pbc] \\ [Pbc] & [Pcc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} [P] & [Pc] \\ [Pc] & [Pcc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{33} = \begin{vmatrix} [P] & [Pb] \\ [Pb] & [Pbb] \end{vmatrix}. \quad (9.58)$$

Из выражений (9.57), с учетом (9.27) и (9.38) видно, что веса уравненных значений неизвестных являются функциями только зенитных расстояний и азимутов светил и не зависят от широты пункта. Поэтому средние квадратические погрешности принятых независимых параметров, определяемые формулами (9.55), также не зависят от широты пункта.

На основании (9.50) и (9.51) средние квадратические погрешности геодезического азимута и астрономо-геодезических составляющих уклонения отвесной линии будут

$$m_{a_r}^2 = m_{a'}^2 + m_L^2 \sin^2 \varphi; \quad m_{\xi}^2 = m_x^2 + m_y^2;$$

$$m_{\eta}^2 = m_y^2 + m_L^2 \cos^2 \varphi. \quad (9.59)$$

Полагая, что в среднем для пунктов астрономо-геодезической сети погрешности геодезических координат существенно меньше погрешностей астрономических определений, получим

$$m_{a_r} \approx m_{a'}, \quad m_{\xi} \approx m_x, \quad m_{\eta} \approx m_y. \quad (9.60)$$

Из выражений (9.60), с учетом сделанных выше замечаний относительно (9.57) и (9.58), следует, что точность непосредственного определения геодезического азимута и составляющих уклонения отвесной линии на пунктах Лапласа определяется в основном точностью астрономических определений и не зависит от широты пункта.

Средние квадратические погрешности определения астрономических координат и астрономического азимута на основании (9.41) и (9.42) будут

$$m_{\varphi} = m_x; \quad m_{\lambda} = \frac{1}{15} m_y \sec \varphi, \quad (9.61)$$

$$m_a^2 = m_{a'}^2 + m_y^2 \operatorname{tg}^2 \varphi. \quad (9.62)$$

Из формул (9.61) и (9.62) следует:

погрешность определения астрономической широты не зависит от широты пункта;

погрешность астрономической долготы (времени) возрастает с увеличением широты пропорционально $\sec \varphi$ независимо от методов ее определения;

погрешность астрономического азимута возрастает с увеличением широты в соответствии с формулой (9.62); подробный анализ функции (9.62) будет дан в следующем параграфе, после рассмотрения выражений весов уравненных величин.

**§ 63. ОБОСНОВАНИЕ ВЫГОДНЕЙШИХ УСЛОВИЙ
НАБЛЮДЕНИЙ. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ О МЕТОДИКЕ
ВЫЧИСЛЕНИЙ В АЗИМУТАЛЬНЫХ СПОСОБАХ
АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ**

Обоснование выгоднейших условий наблюдений в способах астрономических определений должно строиться на принципе максимального веса уравненных значений определяемых величин. Следовательно, для установления выгоднейших условий наблюдений при определении азимута и составляющих уклонения отвесной линии необходимо обратиться к анализу выражений весов их уравненных значений.

Подставив в формулы (9.57) значения определителя системы нормальных уравнений и алгебраических дополнений квадратичных элементов, после несложных преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} P_{a'} &= \frac{\Delta}{\Delta_{11}} = [P] - \frac{[Pc]^2}{[Pcc]} - \frac{\left\{ [Pb] - \frac{[Pc][Pbc]}{[Pcc]} \right\}^2}{[Pbb] - \frac{[Pbc]^2}{[Pcc]}}; \\ P_x &= \frac{\Delta}{\Delta_{22}} = [Pbb] - \frac{[Pb]^2}{[P]} - \frac{\left\{ [Pbc] - \frac{[Pb][Pc]}{[P]} \right\}^2}{[Pcc] - \frac{[Pc]^2}{[P]}}; \\ P_y &= \frac{\Delta}{\Delta_{33}} = [Pcc] - \frac{[Pc]^2}{[P]} - \frac{\left\{ [Pbc] - \frac{[Pc][Pb]}{[P]} \right\}^2}{[Pbb] - \frac{[Pb]^2}{[P]}}. \end{aligned} \right\} \quad (9.63)$$

На основании (9.27) и (9.38) окончательно будем иметь:

$$P_{a'} = [\sin^2 z] - \frac{[\sin z \cos z \cos A]^2}{[(\cos z \cos A)^2]} - \frac{\left\{ -[\sin z \cos z \sin A] - \frac{[\cos z \sin z \cos A][\cos^2 z \sin A \cos A]}{[(\cos z \cos A)^2]} \right\}^2}{[(\cos z \sin A)^2] - \frac{[\cos^2 z \cos A \sin A]^2}{[(\cos z \cos A)^2]}}; \quad (9.64)$$

$$P_x = [(\cos z \sin A)^2] - \frac{[\sin z \cos z \sin A]^2}{[\sin^2 z]} - \frac{\left\{ -[\cos^2 z \cos A \sin A] - \frac{[\sin z \cos z \sin A][\sin z \cos z \cos A]}{[\sin^2 z]} \right\}^2}{[(\cos z \cos A)^2] - \frac{[\sin z \cos z \cos A]^2}{[\sin^2 z]}}; \quad (9.65)$$

$$P_y = [(\cos z \cos A)^2] - \frac{[\sin z \cos z \cos A]^2}{[\sin^2 z]} - \frac{\left\{ -[\cos^2 z \cos A \sin A] - \frac{[\sin z \cos z \cos A][\sin z \cos z \sin A]}{[\sin^2 z]} \right\}^2}{[(\cos z \sin A)^2] - \frac{[\sin z \cos z \sin A]^2}{[\sin^2 z]}}. \quad (9.66)$$

Из полученных выражений видно, что веса уравненных значений принятых независимых параметров зависят только от числа n наблюдаемых светил и выбора их по зенитным расстояниям и азимутам и не зависят от широты пункта.

В соответствии с поставленной общей задачей выражения весов справедливы для любого произвольного распределения светил по их горизонтальным координатам.

Неопределенности выражений весов для наблюдений светил в меридиане или первом вертикале объясняются нулевыми значениями коэффициентов b_i или c_i для этих вертикалов. Указанные неопределенности легко раскрываются. Действительно, для наблюдений в меридиане коэффициенты $b_i = 0$, и система нормальных уравнений принимает вид

$$\left. \begin{aligned} [P] \Delta a' + [Pc] y + [Pl] &= 0; \\ [Pc] \Delta a' + [Pcc] y + [Pcl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.67)$$

Выражения весов для светил в меридиане будут

$$P_{a'} = \frac{\Delta'}{\Delta_{11}} = [\sin^2 z] - \frac{[\sin z \cos z \cos A]^2}{[(\cos z \cos A)^2]}, \quad (9.64')$$

$$P_x = 0, \quad (9.65')$$

$$P_y = \frac{\Delta'}{\Delta_{22}} = [(\cos z \cos A)^2] - \frac{[\sin z \cos z \cos A]^2}{[\sin^2 z]}. \quad (9.66')$$

Для наблюдений в первом вертикале ($c_i = 0$) система нормальных уравнений и выражения весов соответственно будут

$$\left. \begin{aligned} [P] \Delta a' + [Pb] x + [Pl] &= 0; \\ [Pb] \Delta a' + [Pbb] x + [Pbl] &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9.68)$$

$$P_{a'} = \frac{\Delta''}{\Delta_{11}} = [\sin^2 z] - \frac{[\sin z \cos z \sin A]^2}{[(\cos z \sin A)^2]}, \quad (9.64'')$$

$$P_x = \frac{\Delta''}{\Delta_{22}} = [(\cos z \sin A)^2] - \frac{[\sin z \cos z \sin A]^2}{[\sin^2 z]}, \quad (9.65'')$$

$$P_y = 0 \quad (9.66'')$$

Из выражений (9.64), (9.64'), (9.64'') следует, что для определения условного азимута a' с наибольшим весом необходимо:

наблюдения светил производить на больших зенитных расстояниях; практически выбор светил для определения азимута следует производить в пределах по зенитному расстоянию от 50° до 80° ; на зенитных расстояниях, превышающих 80° , производить наблюдения нецелесообразно вследствие неблагоприятного влияния колебаний нижних слоев атмосферы на качество изображений светил, а также возможного влияния боковой рефракции;

z_{cp}	45°	50°	60°	70°	80°
$P_{a'}$	0,50n	0,59n	0,75n	0,88n	0,97n

выбор светил осуществлять при соблюдении условий симметричности

$$\left. \begin{aligned} [\sin z \cos z \cos A] &= 0; \\ [\sin z \cos z \sin A] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.69)$$

Условия симметричности (9.69) будут соблюдены: при равномерном распределении светил по азимутам; при наблюдениях светил в плоскости любого произвольного вертикала, равным числом по обе стороны от зенита, примерно на одинаковых средних зенитных расстояниях.

При соблюдении условий (9.69) вес уравненного азимута будет

$$P_{a'} \approx n \sin^2 z_{cp}, \quad (9.70)$$

где n — число светил, послуживших для вывода азимута.

На основании (9.60) вес геодезического азимута, определенного непосредственным методом, практически равен весу уравненного значения условного азимута, т. е.

$$P_{a_r} \approx P_{a'}.$$

В зависимости от среднего зенитного расстояния наблюдаемых светил вес условного (геодезического) азимута, найденный по формуле (9.70), дан в табл. 58.

Для установления выгоднейших условий определения астрономического азимута и веса его уравненного значения необходимо произвести анализ выражения (9.62). Анализ формулы $m_a^2 = m_a^2 + m_y^2 \operatorname{tg}^2 \varphi$ позволяет сделать вывод, что погрешность определения астрономического азимута будет минимальна при наблюдениях звезд в меридиане, расположенных симметрично относительно зенита. В этом случае, с учетом весов уравненных величин, представленных формулами (9.64')—(9.66'), получим

$$m_a^2 = \frac{\mu^2}{n \sin^2 z_{cp}} + \frac{\mu^2}{n \cos^2 z_{cp}} \operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{\mu^2}{n} \left(\frac{1}{\sin^2 z_{cp}} + \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{\cos^2 z_{cp}} \right), \quad (A)$$

где z_{cp} — среднее зенитное расстояние наблюдаемых звезд, n — общее число звезд, необходимое для определения a' и y . Для

пункта с широтой φ , при данных средствах наблюдений (данном значении μ), наименьшая погрешность астрономического азимута будет при

$$F = \frac{1}{\sin^2 z_{cp}} + \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{\cos^2 z_{cp}} = \min, \quad \text{т. е. при } \frac{\partial F}{\partial z} = 0.$$

В результате дифференцирования будем иметь

$$\frac{\partial F}{\partial z} = 2 \sin z_{cp} \cos z_{cp} \left(-\frac{1}{\sin^4 z_{cp}} + \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{\cos^4 z_{cp}} \right).$$

Для выполнения условия $\frac{\partial F}{\partial z} = 0$, очевидно, необходимо, чтобы

$$\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{\cos^4 z_{cp}} - \frac{1}{\sin^4 z_{cp}} = 0, \quad (Б)$$

откуда

$$\operatorname{tg} z_{cp} = \sqrt{\operatorname{ctg} \varphi}. \quad (Б)$$

Решение уравнения (Б) позволяет также найти

$$\sin^2 z_{cp} = \frac{1}{1 + \operatorname{tg} \varphi} \quad \text{и} \quad \cos^2 z_{cp} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{1 + \operatorname{tg} \varphi}. \quad (Г)$$

С учетом полученных выражений наименьшая погрешность астрономического азимута для пункта с широтой φ на основании (А) и (Г) будет

$$m_a = \frac{\mu}{\sqrt{n}} (1 + \operatorname{tg} \varphi), \quad (9.62')$$

при этом наблюдения северной и южной групп звезд необходимо производить на среднем зенитном расстоянии, определяемом формулами (Б) или (Г).

Исследование формулы $m_a^2 = m_a'^2 + m_y^2 \operatorname{tg}^2 \varphi$ показывает, что погрешность будет близка к своему минимальному значению:

при условии $m_a' = m_y \operatorname{tg} \varphi$, что соответствует наблюдениям двух численно равных групп звезд в меридиане, расположенных симметрично относительно зенита, на среднем зенитном расстоянии $z_{cp} = 90^\circ - \varphi$, т. е. на зенитном расстоянии Полярной звезды; при этом наблюдения северной группы из $\frac{n}{2}$ звезд можно заменить многократными наблюдениями Полярной;

при условии $m_a' = m_y$, что соответствует наблюдениям двух численно равных групп звезд в меридиане, расположенных симметрично относительно зенита, на среднем зенитном расстоянии $z_{cp} = 45^\circ$; такое же ожидаемое значение m_a будет при наблюдениях одной группы из $\frac{n}{2}$ звезд вблизи зенита и другой группы из $\frac{n}{2}$ звезд вблизи горизонта; при этом звезды в каждой группе должны располагаться симметрично относительно зенита.

Средняя квадратическая погрешность определения астрономического азимута при соблюдении указанных условий будет ¹

$$m_a = \frac{\mu}{\sqrt{n}} \sqrt{2} \sec \varphi = m_{a'} \sec \varphi, \quad (9.62'')$$

где n — число звезд, необходимое для совместного определения a' и y .

Очевидно, такое же значение погрешности астрономического азимута будет и при отдельных определениях a' и y . При этом случайные погрешности определения астрономического азимута будут примерно одинаковы как для многократных наблюдений Полярной, так и для наблюдений группы звезд вблизи горизонта, расположенных симметрично относительно зенита. В последнем случае выбор вертикала для наблюдений звезд не имеет принципиального значения.

Численные значения погрешностей астрономического азимута, соответствующие формулам (9.62') и (9.62''), представлены в табл. 59. Из табл. 59 следует, что погрешность определения астрономического азимута, подсчитанная по формуле (9.62'') для широт от 20 до 75°, практически не отличается от минимальной погрешности астрономического азимута, определяемой формулой (9.62').

На этом основании можно полагать, что средняя квадратическая погрешность определения астрономического азимута возрастает с увеличением широты пункта пропорционально $\sec \varphi$ независимо от методов его определения.

Вес астрономического азимута, в соответствии с (9.62''), будет

$$P_a = P_{a'} \cos^2 \varphi. \quad (9.70')$$

Численные значения средних зенитных расстояний звезд при определениях астрономического азимута для всех указанных выше условий представлены в табл. 60.

Как видно, для широт от 20 до 70 теоретические значения средних зенитных расстояний, соответствующих минимальной погрешности астрономического азимута, находятся почти строго на середине между значениями $z_{\text{ср}} = 90^\circ - \varphi$ и $z_{\text{ср}} = 45^\circ$.

Анализ выражений весов (9.65) и (9.66) позволяет установить выгоднейшие условия наблюдений для определения составляющих уклонения отвесной линии (широты и времени).

¹ Если $m_{a'} = m_y \operatorname{tg} \varphi$, то на основании (9.62) $m_a^2 = 2m_{a'}^2$ и $m_a = m_{a'} \sqrt{2}$. Но при $z_{\text{ср}} = 90^\circ - \varphi$, $m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{n} \sin z_{\text{ср}}} = \frac{\mu}{\sqrt{n}} \sec \varphi$, поэтому $m_a = \frac{\mu}{\sqrt{n}} \times \sqrt{2} \sec \varphi$. Если $m_{a'} = m_y$, то на основании (9.62) $m_a = m_{a'} \sec \varphi$. При $z_{\text{ср}} = 45^\circ$, $m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{n} \sin 45^\circ} = \frac{\mu}{\sqrt{n}} \sqrt{2}$; поэтому также, как и в первом случае, будем иметь $m_a = \frac{\mu}{\sqrt{n}} \sqrt{2} \sec \varphi = m_{a'} \sec \varphi$.

m_a	φ°										
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
$m_a = \frac{\mu}{\sqrt{n}} (1 + \operatorname{tg} \varphi)$	$\frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$1,18 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$1,36 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$1,58 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$1,84 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$2,00 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$2,19 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$2,73 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$3,75 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$6,67 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	∞
$m_a = \frac{\mu}{\sqrt{n}} \sqrt{2} \sec \varphi$	$\pm 1,41 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$\pm 1,43 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$1,50 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$1,63 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$1,84 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$2,00 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$2,20 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$2,83 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$4,13 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	$8,14 \frac{\mu}{\sqrt{n}}$	∞

Таблица 60

φ°	$z_{\text{CP}} = \operatorname{arctg} \sqrt{\operatorname{ctg} \varphi}$	$z_{\text{CP}} = 90^\circ - \varphi$	$z_{\text{CP}} = 45^\circ$
0°	90°	90°	45°
10	67,2	80	45
20	58,9	70	45
30	52,7	60	45
40	47,5	60	45
45	45,0	45	45
50	42,5	40	45
60	37,2	30	45
70	1,1	20	45
80	2,8	10	45

$z_{\text{ср}}$	5°	10°	20°	30°	40°	45°
$P_{\varphi} = P_x$	0,99	0,97	0,88	0,97	0,59	0,50

Так, для определения x (φ) с максимальным весом [см. формулы (9.65) и (9.65'')] наблюдения светил следует производить в первом вертикале, на малых зенитных расстояниях, равным числом по обе стороны от зенита. При указанном выборе звезд

$$[\sin z \cos z \sin A] \approx 0 \quad (9.71)$$

и, следовательно,

$$P_{\varphi} = P_x = [\cos^2 z] \approx n \cos^2 z_{\text{ср}}. \quad (9.72)$$

В зависимости от среднего зенитного расстояния вес P_x дан в табл. 61.

Для определения y с максимальным весом [см. формулы (9.66) и (9.66')] наблюдения светил необходимо производить в меридиане, на малых зенитных расстояниях, симметрично относительно зенита. При указанном выборе звезд

$$[\sin z \cos z \cos A] \approx 0 \quad (9.73)$$

и, следовательно,

$$P_y = [\cos^2 z] \approx n \cos^2 z_{\text{ср}}. \quad (9.74)$$

Численное значение P_y в зависимости от среднего зенитного расстояния наблюдаемых звезд, можно представить в виде такой же таблицы, как и для P_x . На основании (9.61) вес уравненного значения долготы (времени) будет

$$P_{\lambda} = P_u = P_y \cos^2 \varphi. \quad (9.74')$$

Равенства (9.65') и (9.66'') являются следствием очевидного положения, что посредством азимутальных наблюдений светил в меридиане невозможно определить составляющую уклонения отвеса x (ξ), а из наблюдений светил в первом вертикале невозможно определить составляющую уклонения отвеса y (η).

В способах совместного определения азимута и составляющих уклонения отвесной линии нельзя достигнуть максимального веса уравненного значения одновременно для всех определяемых величин. Поэтому при совместном определении указанных величин нужно задаться необходимым для решения данной задачи соотношением весов их уравненных значений, т. е. поставить дополнительное условие вида

$$P_{u'} = k_x P_x = k_y P_y, \quad (9.75)$$

где k_x и k_y — коэффициенты пропорциональности, устанавливаемые для каждой конкретной задачи.

Найдем, например, условия выбора светил для совместного определения a' , x и y , при которых веса их уравненных значений будут равны между собой, т. е. потребуем, чтобы

$$\left. \begin{aligned} k_x = k_y = 1; \\ P_{a'} = P_x = P_y. \end{aligned} \right\} \quad (9.76)$$

Из анализа выражений весов уравненных значений $P_{a'}$, P_x и P_y следует, что для выполнения условий (9.76) необходимо светила наблюдать на каком-то среднем зенитном расстоянии, при равномерном их расположении по азимутам, т. е. при соблюдении следующих условий:

$$\left. \begin{aligned} [\sin z \cos z \cos A] = \sin z_{cp} \cos z_{cp} [\cos A] = 0; \\ [\sin z \cos z \sin A] = \sin z_{cp} \cos z_{cp} [\sin A] = 0; \\ [\cos^2 z \cos A \sin A] = \cos^2 z_{cp} [\cos A \sin A] = 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.77)$$

В этом случае веса уравненных значений, представленные формулами (9.64), (9.65) и (9.66), примут соответственно вид

$$\left. \begin{aligned} P_{a'} = [\sin^2 z] \approx n \sin^2 z_{cp}; \\ P_x = [(\cos z \sin A)^2] \approx \cos^2 z_{cp} [\sin^2 A] = \frac{n}{2} \cos^2 z_{cp}; \\ P_y = [(\cos z \cos A)^2] \approx \cos^2 z_{cp} [\cos^2 A] = \frac{n}{2} \cos^2 z_{cp}. \end{aligned} \right\} \quad (9.78)$$

Из выражений (9.78) найдем то среднее зенитное расстояние, на котором необходимо наблюдать светила, чтобы выполнить условие равенства весов (9.76).

Для этого, очевидно, необходимо потребовать, чтобы

$$n \sin^2 z_{cp} = \frac{n}{2} \cos^2 z_{cp},$$

откуда

$$\operatorname{tg}^2 z_{cp} = \frac{1}{2} \text{ и } z_{cp} = 35,3^\circ.$$

Необходимо отметить, что условия (9.77) будут также соблюдены, и веса, представленные формулами (9.78), будут теми же, если выбор светил для совместного определения a' , x и y производить в плоскостях двух любых взаимно перпендикулярных вертикалов симметрично относительно зенита.

Таким образом, для совместного определения азимута и составляющих уклонения отвесной линии при условии равенства весов их уравненных значений светила необходимо наблюдать на среднем зенитном расстоянии $z_{cp} = 35,3^\circ$, распределяя их либо равномерно по азимутам или располагая в плоскостях двух любых взаимно перпендикулярных вертикалов симметрично

относительно зенита; численные значения весов уравненных величин на основании (9.78) при этом будут

$$P_{a'} = P_x = P_y = \frac{n}{3}. \quad (9.79)$$

Очевидно, что при изменении среднего зенитного расстояния наблюдаемых светил будет изменяться соотношение весов уравненных значений неизвестных.

Так, если среднее зенитное расстояние будет меньше $35,3^\circ$, то условные составляющие уклонения отвесной линии будут определяться с весом, превышающим вес азимута; если же среднее зенитное расстояние наблюдаемых светил будет больше $35,3^\circ$, то в этом случае вес азимута будет больше весов условных составляющих уклонения отвесной линии. При этом в обоих случаях, если соблюдаются условия равномерного распределения светил по азимутам [условия (9.77)], веса уравненных значений x и y , определяемых формулами (9.78), будут одинаковы.

В качестве примера найдем еще численные значения весов для случая совместного определения a' , x и y , когда вес азимута будет в два раза больше, чем веса условных составляющих уклонения отвесной линии. Для этого в формуле (9.75) необходимо положить $k_x = k_y = 2$ и, следовательно,

$$P_{a'} = 2P_x = 2P_y. \quad (9.80)$$

При соблюдении условий равномерного распределения светил по азимутам (или расположения их в плоскостях двух взаимно перпендикулярных вертикалов симметрично относительно зенита) из выражений (9.78), на основе требования (9.80), найдем

$$n \sin^2 z_{cp} = 2 \frac{n}{2} \cos^2 z_{cp},$$

откуда

$$\operatorname{tg}^2 z_{cp} = 1 \text{ и } z_{cp} = 45^\circ.$$

Численные значения весов уравненных величин при наблюдениях светил на среднем зенитном расстоянии $z_{cp} = 45^\circ$ будут

$$P_{a'} = \frac{n}{2}, \quad P_x = \frac{n}{4}, \quad P_y = \frac{n}{4}. \quad (9.81)$$

В зависимости от принятых численных значений коэффициентов k_x и k_y в формуле (9.75), при условии равномерного распределения светил по азимутам, значения весов $P_{a'}$, P_x и P_y представлены в табл. 62.

Таким образом, на основе поставленной конкретной задачи по определению a' , x и y , пользуясь выражениями (9.64), (9.65), (9.66) весов уравненных значений неизвестных, можно найти оптимальные условия наблюдений для ее решения. При этом способы отдельного определения азимута и составляющих уклонения

$k_x = k_y$	z_{cp}	$P_{a'}$	P_x	P_y
$\frac{1}{16}$	10,0°	0,03	0,485	0,485
$\frac{1}{8}$	14,0	0,06	0,47	0,47
$\frac{1}{4}$	19,5	0,12	0,44	0,44
$\frac{1}{2}$	26,5	0,20	0,40	0,40
1	35,3	0,33	0,33	0,33
2	45,0	0,50	0,25	0,25
4	54,8	0,66	0,16	0,16
8	63,5	0,80	0,10	0,10
12	70,5	0,89	0,055	0,055

отвесной линии можно рассматривать как частные случаи способов совместного определения указанных величин.

Если в способах совместного определения принимается, как правило, условие равенства весов $P_{a'} = P_x = P_y$, то в способах раздельного определения выгоднейшими условиями наблюдений являются, как указывалось выше, условия, при которых вес уравненного значения определяемой величины будет максимальным, т. е.

$$P_{a'} = \max, \quad P_x = \max, \quad P_y = \max.$$

Нетрудно показать, что если из общего числа n звезд, необходимых для раздельного определения a' , x и y , были произведены измерения горизонтальных направлений (углов) на $\frac{n}{3}$ звезд в условиях, обеспечивающих получение каждой из трех величин с максимальным весом, то в отношении действия случайных погрешностей измерений это равносильно совместному определению указанных величин из наблюдений n звезд в условиях, обеспечивающих равенство весов $P_{a'} = P_x = P_y$ (т. е. при наблюдениях звезд на $z_{cp} = 35,3^\circ$ и равномерном их распределении по азимутам).

Таким образом, если при одинаковой методике измерений затраты средств и времени исчислять числом наблюдаемых светил, то для достижения одинаковой точности определяемых величин способы совместного определения a_1 , x и y не имеют преимущества перед способами их раздельного определения.

Если же учитывать возможное влияние систематических погрешностей наблюдений, то способы раздельного определения неизвестных будут предпочтительнее способов совместного их определения, так как при раздельных определениях, производимых в наивыгоднейших условиях, наиболее полно ослабляется влияние не только случайных, но и систематических источников погрешностей.

При обосновании способов геодезической астрономии должно соблюдаться то правило, что наибольшей точности определений достигают не посредством большого числа наблюдений менее точных, а посредством малого числа наблюдений, точных во всех их элементах.

Построение целесообразных способов как совместного, так и раздельного определения a' , x и y требует также неуклонного соблюдения принципа симметрии в выборе светил по зенитным расстояниям и азимутам.

При соблюдении этого принципа неквадратичные коэффициенты системы нормальных уравнений становятся близкими к нулю, а сами нормальные уравнения слабо зависимы между собой. Вследствие этого существенно повышаются вес и точность уравниваемых величин, особенно в способах раздельного определения азимута и составляющих уклонения отвесной линии. Для этих способов повышение точности одной определяемой величины происходит за счет резкого понижения точности других необходимых величин. Нарушение принципа симметрии в выборе светил для таких условий неминуемо приводит к плохой обусловленности системы нормальных уравнений и снижению точности определяемой величины.

Приведенное выше решение общей задачи позволяет создать не только строгую и общую для всех способов методику обоснования выгоднейших условий наблюдений, основанную на анализе весов уравненных значений определяемых неизвестных, но также и общую методику вычислений и оценки точности. Так как при постановке общей задачи не ставилось каких-либо ограничивающих условий на выбор светил по зенитным расстояниям и азимутам, то поэтому все способы как совместного, так и раздельного определения искомых величин вытекают из решения общей задачи как отдельные частные случаи.

На этом основании приведенное решение общей задачи по методу наименьших квадратов является общей методикой вычислений и оценки точности для всех способов совместного или раздельного определения искомых неизвестных, в которых число n независимых измерений горизонтальных углов или направлений больше числа k ($n > k$) необходимых неизвестных, входящих в уравнения поправок (9.39) или (9.40). Указанное положение справедливо не только для одинарных наблюдений n светил, но и для многократных наблюдений нескольких или даже одного светила.

Некоторые особенности вычислений и оценки точности возникают в тех способах, в которых для совместного или раздельного определения искомых величин наблюдаются короткие серии, состоящие из трех или двух звезд. Указанные способы характеризуются отсутствием избыточных измерений в каждой серии, т. е. для них, как правило, соблюдается условие $n = k$.

В этом случае, как известно, нельзя уравнивать по методу наименьших квадратов, и мы будем иметь систему из $n = k$ обычных линейных уравнений вида (9.39) или (9.40). Решение системы линейных уравнений при $n = k$ любым способом дает единственные значения определяемых неизвестных, при которых правые части уравнений становятся равными нулю.

Для получения полной аналогии вычислений уравниванием необходимо от системы $n = k$ линейных уравнений вида (9.39) или (9.40) перейти к обычной системе из k нормальных уравнений. В этом случае определение неизвестных и их весов осуществляется по общим стандартным формулам (9.53) и (9.57).

Окончательные значения искомых величин из N независимых серий звезд и оценку точности при числе измерений в каждой серии при $n > k$ или $n = k$ получают по известным формулам среднего весового. Таким образом, на основе решения общей задачи оказывается возможным применить единый метод вычислений и оценки точности для всей совокупности азимутальных способов. Предлагаемый метод позволил создать и реализовать универсальный алгоритм и единую программу вычислений на ЭЦВМ для всех азимутальных способов [78]. Он позволяет также существенно упростить и унифицировать процесс вычислений с помощью обычных вычислительных средств.

Несомненными достоинствами указанного метода являются общность и строгость решения задачи, а также возможность максимальной автоматизации процесса вычислений.

§ 64. КЛАССИФИКАЦИЯ АЗИМУТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Обоснование различных азимутальных способов строится на соответствующем подборе светил по зенитным расстояниям и азимутам, обеспечивающим получение определяемых величин с максимальным весом. Поэтому представляется целесообразным в основу классификации азимутальных способов положить принцип выбора светил по зенитным расстояниям и азимутам. При этом возможные комбинации выбора светил составляют три основных группы азимутальных способов.

Первую группу составляют способы, основанные на наблюдениях светил в различных вертикалах и на различных зенитных расстояниях.

Ко второй группе относятся способы, в которых наблюдения светил производятся в различных вертикалах, но

I. Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений светил в различных вертикалах и на различных зенитных расстояниях	II. Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений светил на равных высотах (азимутальные способы равных высот)	III. Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений групп звезд в плоскости одного вертикала (способы равных азимутов)
<p>1. Совместное определение a_r, φ и λ из наблюдений n светил в различных вертикалах и на различных зенитных расстояниях</p> <p>2. Совместное определение a_r, φ и λ из наблюдений n светил вблизи плоскостей двух взаимно перпендикулярных вертикалов</p> <p>3. Совместное определение a_r, φ и λ из многократных наблюдений одного и того же светила</p> <p>4. Определение a_r из наблюдений ярких звезд в разных вертикалах</p> <p>5. Определение a_r из многократных наблюдений ярких звезд вблизи меридиана</p> <p>6. Определение a_r из многократных наблюдений ярких звезд вблизи первого вертикала</p> <p>7. Определение a_r из многократных наблюдений ярких звезд вблизи двух взаимно перпендикулярных вертикалов</p> <p>8. Определение астрономического азимута по измеренному горизонтальному углу между Полярной и местным предметом</p> <p>9. Определение азимута из наблюдений звезд в элонгации</p>	<p>1. Совместное определение a_r, φ и λ по измеренным горизонтальным углам между местным предметом и светилами в одном альмукантарате</p> <p>2. Совместное определение M_N, φ и λ по измеренным горизонтальным направлениям на n светил в одном альмукантарате</p> <p>3. Совместное определение φ и λ по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равных высотах</p> <p>4. Определение a_r из наблюдений пар звезд на равных высотах</p> <p>5. Определение широты по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равных высотах</p> <p>6. Определение долготы по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равных высотах</p>	<p>1. Совместное определение a_r, φ и λ из наблюдений групп звезд в плоскостях двух взаимно перпендикулярных вертикалов</p> <p>2. Определение a_r из наблюдений прохождений звезд в вертикале местного предмета</p> <p>3. Определение a_r из наблюдений n звезд в меридиане</p> <p>4. Определение a_r из наблюдений пар звезд в меридиане</p> <p>5. Определение a_r из наблюдений звезд в первом вертикале</p> <p>6. Определение времени и долготы из наблюдений n звезд в вертикале меридианной миры</p> <p>7. Определение времени и долготы из наблюдений n звезд в меридиане с помощью пассажного инструмента</p> <p>8. Определение времени и долготы из наблюдений пар звезд в вертикале меридианной миры</p> <p>9. Определение времени и долготы из наблюдений пар звезд в меридиане при одном положении горизонтальной оси прибора</p>

I. Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений светил в различных вертикалах и на различных зенитных расстояниях	II. Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений светил на равных высотах (азимутальные способы равных высот)	III. Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений групп звезд в плоскости одного вертикала (способы равных азимутов)
<p>10. Определение времени и долготы пункта по измеренным горизонтальным направлениям на n светил вблизи меридиана</p> <p>11. Определение времени и долготы по разностям измеренных горизонтальных направлений пар ярких звезд вблизи меридиана</p> <p>12. Определение времени и долготы по измеренным горизонтальным направлениям на Полярную и южные звезды</p> <p>13. Определение широты по измеренным горизонтальным углам между светилами вблизи первого вертикала и местным предметом</p> <p>14. Определение широты по измеренным горизонтальным направлениям на n светил вблизи первого вертикала</p> <p>15. Определение широты по разностям измеренных горизонтальных направлений пар ярких звезд вблизи первого вертикала</p>		<p>10. Определение времени и долготы из наблюдений прохождений южных звезд в вертикале Полярной</p> <p>11. Определение времени и долготы из наблюдений южных звезд в вертикалах северных звезд</p> <p>12. Определение времени и долготы по разности измеренных горизонтальных направлений пар звезд в меридиане</p> <p>13. Определение широты из наблюдений n звезд в первом вертикале</p> <p>14. Определение широты из наблюдений звезд в первом вертикале пассажным инструментом</p> <p>15. Определение широты из наблюдений пар звезд в вертикале мира</p> <p>16. Определение широты из наблюдений пар звезд в первом вертикале при одном положении горизонтальной оси прибора</p> <p>17. Определение широты по наблюдениям пар звезд в общем вертикале</p>

на равных зенитных расстояниях. Способы этой группы можно назвать азимутальными способами равных высот.

И, наконец, к третьей группе следует отнести способы, в которых наблюдения светил производятся в плоскости одного вертикала на различных зенитных расстояниях. Способы третьей группы можно назвать кратко способами равных азимут.

Характерной особенностью первых двух групп способов является то, что наблюдения в них связаны с измерением горизонтальных направлений на светила или горизонтальных углов между местным предметом и светилами.

Характерной особенностью наблюдений в третьей группе способов является то, что измерения горизонтальных направлений на светила здесь могут быть не связаны с производством точных отсчетов по горизонтальному лимбу прибора. Неизвестная поправка к установочному (предварительному) значению азимута вертикала, в котором установлен прибор, находится из обработки самих наблюдений. При наблюдениях светил в плоскости одного вертикала можно также применить метод измерения малого горизонтального угла Q между земным предметом и светилом, наблюдаемым в вертикале предмета с помощью окулярного микрометра прибора.

В каждой из трех указанных групп различные способы можно классифицировать по признаку определяемых из наблюдений величин, например:

способы совместного определения азимута (направления меридиана) и составляющих уклонения отвесной линии (широты и долготы),

способы определения азимута направления на местный предмет,

способы определения широты (ξ),

способы определения долготы (времени или η).

Наконец, в зависимости от числа наблюдаемых светил, все способы можно подразделить на группы, в которых искомые величины определяются:

1) по наблюдениям серии из n звезд,

2) из наблюдений звезд попарно ($n = 2$),

3) из многократных наблюдений одного и того же светила.

В соответствии с изложенной классификацией азимутальные способы астрономических определений представлены в табл. 63.

§ 65. МЕТОД НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИРЕКЦИОННОГО УГЛА НАПРАВЛЕНИЯ НА ЗЕМНОЙ ПРЕДМЕТ ИЗ АЗИМУТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СВЕТИЛ

При производстве различных геодезических работ, например при развитии геодезической сети методами полигонометрии и трилатерации, нередко возникает задача независимых контрольных определений дирекционных углов направлений. Автономные опре-

деления дирекционных углов имеют также важное значение при ориентировании специальных направлений.

Дирекционный угол направления N_{12} с пункта 1 на пункт 2 определяется известной формулой

$$\alpha_{12} = a_{r_{1,2}} - \gamma_1 - \delta_{12}, \quad (9.82)$$

где $a_{r_{1,2}}$ — геодезический азимут направления N_{12} ; γ_1 — гауссово сближение меридианов, вычисленное для пункта 1; δ_{12} — поправка за кривизну изображения геодезической линии на плоскости в проекции Гаусса.

Значения γ_1 и δ_{12} вычисляются по известным из геодезии формулам

$$\gamma_1 = (L_1 - L_0) \sin B_1 + \sin B_1 \cos^2 B_1 (1 + 3\eta^2) \frac{(L_1 - L_0)^3}{3\rho^2} + \dots \quad (9.83)$$

$$\delta_{12} = \frac{\rho}{2R^2} y_m (x_2 - x_1) \approx 0,00253'' y_m \Delta x, \quad (9.84)$$

где L_0 — долгота осевого меридиана зоны,

$$\eta^2 = e'^2 \cos^2 B,$$

$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$ — второй эксцентриситет, $e^2 \approx \frac{1}{150}$, a и b — большая и малая полуоси принятого при обработке референц-эллипсоида, R — средний радиус кривизны эллипсоида в пункте наблюдения, y_m — средняя ордината пунктов 1 и 2, x_1 и x_2 — абсциссы пунктов 1 и 2.

Вычисление γ_1 по формуле (9.83) выполняется с погрешностью, не превышающей $0,1''$ на краю шестиградусной зоны. Для вычисления δ_{12} с такой же точностью прямоугольные координаты пунктов 1 и 2 достаточно знать с погрешностями порядка 100 м, что практически обеспечивает карта масштаба 1 : 100 000.

Обычный косвенный метод определения дирекционного угла направления из астрономических наблюдений очень громоздок. Он требует выполнения полного комплекса астрономических определений, включающего определение астрономического азимута направления, астрономической широты и астрономической долготы пункта.

Метод непосредственного определения геодезического азимута позволяет получить дирекционный угол направления без определения астрономических координат пункта. Однако он требует знания точных геодезических координат пункта, что в полевых условиях не всегда возможно.

На основе изложенной выше теории условного азимута может быть предложен метод непосредственного определения дирекционного угла направления из азимутальных наблюдений светил, исключаящий как определение астрономических координат, так и знание точных

геодезических координат пункта. С условными координатами пункта φ_0 и λ_0 , снятыми с карты с погрешностью $0,1'$ в любой точке местности, из азимутальных наблюдений n светил (измеряют горизонтальные углы Q между светилами и местным предметом), путем совместного решения n уравнений поправок вида (9.39) получают условный азимут направления a'_{12} , а с ним по формуле

$$\alpha_{12} = a'_{12} - (\lambda_{01} - L_0) \sin \varphi_{01} - \sin \varphi_{01} \cos^2 \varphi_{01} (1 + 3\eta^2) \frac{(\lambda_{01} - L_0)^3}{3\rho^2} + \Delta'_{12} - \delta_{12} \quad (9.85)$$

вычисляют точный ($|m_\alpha| \leq 0,5''$) дирекционный угол направления с пункта 1 на пункт 2.

Формула (9.85) получена путем подстановки в (9.82) значения a_r из уравнения (9.50) и γ_1 из (9.83).

В этой формуле

$$\Delta'_{12} = \frac{\eta_{01} \cos a'_{12} - \xi_{01} \sin a'_{12}}{\operatorname{tg} z_{12}}, \quad (9.86)$$

$$\xi_{01} = \varphi_{01} - B_1;$$

$$\eta_{01} = (\lambda_{01} - L_1) \cos \varphi_{01}.$$

При выборе условных координат φ_{01} и λ_{01} с карты масштаба $1 : 100\,000$ с погрешностью $0,1'$ и при зенитном расстоянии земного предмета $z_{12} = 90^\circ \pm 30'$ численное значение поправки Δ'_{12} не превышает $0,1''$. Так как погрешность условного азимута a'_{12} при астрономических определениях по программе 1 и 2 класса близка к $0,5''$, то поправкой Δ'_{12} в формуле (9.85) можно пренебречь по малости.

Непосредственный метод определений дает значительное сокращение объема работ и более высокую точность определения дирекционного угла, так как в нем исключаются погрешности, связанные с определением астрономической долготы пункта.

§ 66. РЕДУКЦИИ АЗИМУТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СВЕТИЛ

1. Поправка азимута светила за влияние суточной аберрации

Под действием суточной аберрации светило σ (рис. 89) смещается по дуге большого круга $\sigma E'$ к своему апексу — точке востока E на величину

$$\sigma' \sigma = 0,32'' \cos \varphi \sin \sigma E. \quad (9.87)$$

При вычислениях с видимыми координатами α и δ без учета поправки за суточную аберрацию получим азимут A'_N . Если бы координаты были исправлены, то получили бы азимут A_N .

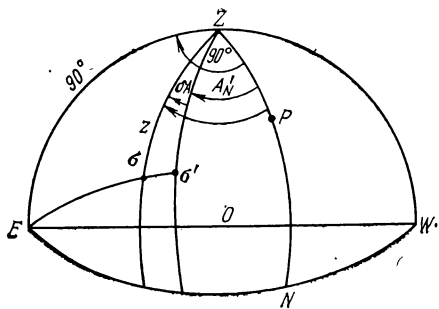


РИС. 89

$$\sin \delta A = \frac{\sin \sigma \sigma' \sin z \sigma' E}{\sin z},$$

откуда по малости δA и $\sigma \sigma'$ получим

$$\delta A = \frac{\sigma \sigma' \sin Z \sigma' E}{\sin z} = \frac{0,32'' \cos \varphi \sin \sigma' E \sin Z \sigma' E}{\sin z}.$$

Из треугольника $Z \sigma' E$ имеем

$$\sin \sigma' E \sin Z \sigma' E = \sin ZE \sin EZ \sigma' = \cos A'_N$$

и, следовательно,

$$\delta A = \frac{0,32'' \cos \varphi \cos A'_N}{\sin z}. \quad (9.89)$$

По формулам (9.88) и (9.89) вычисляется поправка в азимут за влияние суточной aberrации. Знак поправки определяется знаком $\cos A'_N$.

2. Поправка азимута светила, вычисленного со средним моментом наблюдений, за ускорение

Для уменьшения случайной погрешности измерений визирования на каждое светило производится многократно. Так, при измерениях горизонтальных направлений наблюдают моменты прохождения светила через n вертикальных нитей сетки; при наблюдениях с контактным микрометром получают моменты визирования на n контактах микрометра.

Если вычисления азимута светила производят со средним моментом $T_H = \frac{\sum T_i}{n}$, то результат необходимо исправить поправкой за ускорение движения светила по азимуту, так как изменение азимута во времени происходит нелинейно.

Для нахождения поправки обозначим через A'_0 азимут светила, вычисленный со средним моментом T_H , а через A'_i — азимуты

Проще поправку за влияние суточной aberrации вводить не в координаты светила, а в азимут. При этом поправка азимута будет

$$\delta A = A_N - A'_N,$$

откуда

$$A_N = A'_N \pm \delta A. \quad (9.88)$$

Из сферического треугольника $Z \sigma \sigma'$ имеем

Для вычислений азимута светила со средним моментом наблюдений в приеме при двух положениях прибора (КЛ и КП) формула поправки за ускорение принимает вид:

$$\Delta A_W = 5,454 \frac{d^2 A}{dt^2} \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2, \quad (9.95)$$

где

$$\Delta T = T_H - T_L \text{ или } \Delta T = T_H - T_R,$$

$$T_H = \frac{T_L + T_R}{2}, \quad T_{L,R} = \frac{\sum T_{L,Ri}}{n}.$$

Формула (9.95) является приближенной, однако для наблюдений с контактным микрометром она обеспечивает вычисление поправки за ускорение с точностью 0,05" при продолжительности приема $|T_R - T_L| < 10^m$. При большей продолжительности приема для вычислений с той же точностью необходимо учитывать третьи члены разложения ряда Тейлора.

3. Поправка азимута светила за ширину контактов и мертвый ход винта контактного микрометра

При азимутальных наблюдениях с контактным микрометром поправку за ширину контактов Шк и мертвый ход Мх обычно вводят в момент наблюдения светила по формуле

$$\Delta T_{(\text{Шк-Мх})} = \frac{1}{15} (\pm \text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R''}{2} \sec \delta \sec q. \quad (9.96)$$

Знак перед Шк устанавливается на основании следующего правила: если в данном экземпляре хронографа рабочая отметка получается на ленте в момент замыкания электрической цепи, то перед Шк ставится знак «минус»; при работе хронографа на размыкание электрической цепи перед Шк ставится знак «плюс». В формуле (9.96) предполагается также, что мертвый ход вычислен как «звинчивание минус вывинчивание». При вычислениях в большинстве способов оказывается более целесообразным вводить поправку за ширину контактов и мертвый ход не в момент наблюдения, а в азимут светила. Имея в виду, что

$$\Delta A'' = 15 \Delta T'' \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z},$$

формулу для вычисления поправки в азимут получим в виде

$$\Delta A''_{(\text{Шк-Мх})} = (\pm \text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R''}{2} \operatorname{cosec} z. \quad (9.97)$$

Таким образом, окончательное значение азимута светила, вычисленного с условными координатами пункта φ_0 и λ_0 и средним моментом наблюдений T_H , будет

$$A_{0_i} = A'_{0_i} + \delta A_i + \Delta A_{W_i} + \Delta A_{(\text{Шк-Мх})}, \quad (9.98)$$

где

$$A_{0_i} = A'_{0_i} + \sum \delta A_i, \\ \sum \delta A_i = \delta A_i + \Delta A_{W_i} + \Delta A_{(\text{Шк-Мх})}. \quad (9.99)$$

Значение A'_{0_i} вычисляется по формуле

$$\text{ctg } A'_{0_i} = \sin \varphi_0 \text{ ctg } t_{0_i} - \cos \varphi_0 \text{ tg } \delta_i \text{ cosec } t_{0_i},$$

$$t_{0_i} = T_{H_i} + u_0 + \omega (T_H - X) - \alpha_i,$$

где u_0 — поправка хронометра в момент X , полученная из обработки приема радиосигналов времени с условной долготой пункта λ_0 , α_i и δ_i — видимые координаты светила в момент $s = T_H + u_0$, в которых учтено влияние короткопериодических членов нутации.

4. Поправки уравненных значений азимута, широты и долготы за влияние лично-инструментальной разности

Влияние лично-инструментальной разности (постоянной составляющей ∂T лично-инструментальной погрешности) на азимут светила, вычисленный с наблюдаемым моментом T_i , можно выразить формулой

$$\partial A_i = 15 \frac{\partial A}{\partial t_i} \partial T,$$

где

$$\frac{\partial A}{\partial t_i} = \frac{\cos \delta_i \cos q_i}{\sin z_i} = (\sin \varphi - \cos \varphi \text{ tg } z_i \cos A_i).$$

Соответствующее приращение свободного члена уравнения поправок будет

$$\partial l_i = -\partial A_i = -15 (\sin \varphi - \cos \varphi \text{ ctg } z_i \cos A_i) \partial T. \quad (9.100)$$

В общем виде определение влияния лично-инструментальной разности ∂T на уравненные значения a_r (a'), φ (x , ξ), λ (η , y) можно получить на основании решения той же системы нормальных уравнений, из которой находились a' , x и y . Для этого нужно произвести соответствующую замену неизвестных и свободных

членов их искомыми поправками, т. е. решить систему нормальных уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} [P] \delta a' + [Pb] \delta x + [Pc] \delta y + [P \partial l] &= 0; \\ [Pb] \delta a' + [Pbb] \delta x + [Pbc] \delta y + [Pb \partial l] &= 0, \\ [Pc] \delta a' + [Pbc] \delta x + [Pcc] \delta y + [Pc \partial l] &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (9.101)$$

где $\delta a'$, δx , δy — малые поправки за влияние лично-инструментальной разности.

При условии наблюдения светил в узкой зоне по зенитному расстоянию и симметричного их расположения по азимутам можно полагать, что неквадратичные коэффициенты нормальных уравнений пренебрегаемо малы по сравнению с квадратичными коэффициентами. В этом случае значения малых поправок найдутся из выражений:

$$\delta a' = -\frac{[P \partial l]}{[P]}; \quad \delta x = -\frac{[Pb \partial l]}{[Pbb]}; \quad \delta y = -\frac{[Pc \partial l]}{[Pcc]}. \quad (9.102)$$

Подставив в формулу (9.102) значения весов P_i , коэффициентов b_i и c_i и свободных членов ∂l_i , получим

$$\begin{aligned} \delta a' &= \frac{15 [\sin^2 z_i (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{ctg} z_i \cos A_i)] \partial T}{[\sin^2 z_i]} = \\ &= \frac{15 \sin \varphi [\sin^2 z_i] \partial T}{[\sin^2 z_i]} - \frac{15 \partial T \cos \varphi [\sin z_i \cos z_i \cos A]}{[\sin^2 z_i]} = \\ &= 15 \sin \varphi \partial T - \frac{15 \partial T \cos \varphi \operatorname{ctg} z_{cp}}{n} [\cos A_i], \end{aligned} \quad (9.103)$$

$$\begin{aligned} \delta x &= \frac{-15 \partial T [\sin^2 z_i \operatorname{ctg} z_i \sin A_i (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{ctg} z_i \cos A_i)]}{[\sin^2 z_i \operatorname{ctg}^2 z_i \sin^2 A_i]} = \\ &= -\frac{15 \partial T \sin \varphi \operatorname{tg} z_{cp} [\sin A_i]}{[\sin^2 A_i]} + 15 \partial T \cos \varphi \frac{[\cos A_i \sin A_i]}{[\sin^2 A_i]}, \end{aligned} \quad (9.104)$$

$$\begin{aligned} \delta y &= \frac{15 \partial T [\sin^2 z_i \operatorname{ctg} z_i \cos A_i (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{ctg} z_i \cos A_i)]}{[\sin^2 z_i \operatorname{ctg}^2 z_i \cos^2 A_i]} = \\ &= \frac{15 \partial T \sin \varphi \operatorname{tg} z_{cp} [\cos A_i]}{[\cos^2 A_i]} - 15 \partial T \cos \varphi. \end{aligned} \quad (9.105)$$

Из выражения (9.105) следует, что поправка

$$\delta y = \delta \eta = -15 \partial T \cos \varphi \quad (9.106)$$

при условии выбора светил симметрично относительно зенита, т. е. при равномерном расположении светил по азимутам, при наблюдениях в меридиане или в близких к нему вертикалах по обе стороны от зенита, при наблюдениях пар звезд, располагающихся симметрично относительно первого вертикала ($A_2 = 180^\circ - A_1$), и т. д.

Так как $\delta y = 15 \cos \varphi \delta \lambda$, то

$$\delta \lambda = -\partial T. \quad (9.107)$$

Следовательно, поправка в долготу пункта за влияние постоянной составляющей лично-инструментальной погрешности равна абсолютному значению этой погрешности и противоположна ей по знаку. На этом основании лично-инструментальная разность в азимутальных способах определяется из наблюдений долгот на основном пункте и может быть получена по формуле

$$\delta\lambda = \lambda_{\text{осн}} - \lambda'_{\text{осн}},$$

где $\lambda_{\text{осн}}$ — известная долгота основного пункта, $\lambda'_{\text{осн}}$ — долгота основного пункта, полученная из данных наблюдений.

Окончательное значение лично-инструментальной разности находится как минимум из двух ее определений на основном пункте, произведенных до выезда в район полевых работ и после окончания полевых работ.

Из формулы (9.104) следует, что

$$\delta x = \delta\varphi = 0 \quad (9.108)$$

при равномерном расположении светил по азимутам, при наблюдениях в первом вертикале или близких к нему вертикалах по обе стороны от зенита, при наблюдениях пар звезд, располагающихся симметрично относительно меридиана ($A_2 = 360^\circ - A_1$), и т. д. При соблюдении указанных условий в выборе звезд лично-инструментальная разность не оказывает влияния на определение x (φ).

Из формулы (9.103) следует, что

$$\delta a' = 15 \sin \varphi \delta T \quad (9.109)$$

при условии равномерного распределения светил по азимутам или наблюдений их в любом произвольном вертикале, примерно равным числом по обе стороны от зенита, при наблюдениях пар звезд, располагающихся симметрично относительно первого вертикала ($A_2 = 180^\circ - A_1$), и т. д.

С учетом равенства (9.107) будем иметь

$$\delta a' = \delta a_r = -15 \sin \varphi \delta\lambda. \quad (9.110)$$

Из формулы (9.110) следует, что для учета влияния лично-инструментальной разности на условный или геодезический азимуты необходимо получить ее значение из определения долготы основного пункта азимутальными способами, применив при этом методы, сходные с методом наблюдений звезд при определении азимута направления на полевых пунктах.

5. Поправки уравненных значений азимута, широты и долготы за влияние короткопериодических членов нутации

В азимутальных способах, как и в зенитальных, учет влияния короткопериодических членов нутации можно производить двумя путями:

Вводить поправки в видимые экваториальные координаты светила, выбираемые из АЕ, по известным формулам сферической астрономии

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_{\text{nut}} &= A'a + B'b = f' + \frac{1}{15} g' \sin(G' + \alpha) \operatorname{tg} \delta, \\ \Delta\delta_{\text{nut}} &= A'a' + B'b' = g' \cos(G' + \alpha); \end{aligned} \right\} \quad (9.111)$$

исправлять соответствующими поправками уривненные значения a' (a_r), φ (ξ , x) и λ (η , y), полученные из наблюдений, произведенных в течение 2—4 ч.

Второй путь — при ручном счете — менее трудоемкий, чем первый. Поэтому представляется целесообразным его рассмотреть.

Для вывода рабочих формул в этом методе воспользуемся системой тригонометрических формул.

Поправка свободного члена уравнения поправок за влияние короткопериодических членов нутации будет

$$\partial l_{\text{nut}} = -\partial A_{\text{nut}} = -\frac{\partial A}{\partial \delta} \partial \delta_{\text{nut}} + 15 \frac{\partial A}{\partial t} \partial \alpha'_{\text{nut}}, \quad (9.112)$$

где

$$\frac{\partial A}{\partial \delta} = \frac{\sin q}{\sin z}, \quad \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z} = (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{ctg} Z \cos A).$$

Подставив в формулу (9.112) значения $\partial \delta_{\text{nut}}$ и $\partial \alpha'_{\text{nut}}$ из (9.111), получим

$$\begin{aligned} \partial l_{\text{nut}} &= -\frac{\sin q}{\sin z} g' \cos(G' + \alpha) - 15f' \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z} + \\ &+ g' \sin(G' + \alpha) \operatorname{tg} \delta \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z}. \end{aligned} \quad (9.113)$$

В формуле (9.113) произведем замену величины α на равную ей $s - t$

$$\begin{aligned} \cos(G' + \alpha) &= \cos G' \cos \alpha - \sin G' \sin \alpha = \\ &= \cos G' \cos(s - t) - \sin G' \sin(s - t) = \cos G' (\cos s \cos t + \\ &+ \sin s \sin t) - \sin G' (\sin s \cos t - \cos s \sin t) = \cos G' \cos s \cos t + \\ &+ \cos G' \sin s \sin t - \sin G' \sin s \cos t + \sin G' \cos s \sin t = \\ &= \cos t (\cos G' \cos s - \sin G' \sin s) + \sin t (\cos G' \sin s + \\ &+ \sin G' \cos s) = \cos t \cos(G' + s) + \sin t \sin(G' + s), \end{aligned}$$

аналогично

$$\sin(G' + \alpha) = \cos t \sin(G' + s) - \sin t \cos(G' + s).$$

Подставив значения $\cos (G' + \alpha)$ и $\sin (G' + \alpha)$ в формулу (9.113), получим

$$\begin{aligned} \delta l_{\text{nut}} = & 15f' \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z} + \frac{g'}{\sin z} \{ -\sin q \cos t \cos (G' + s) - \\ & - \sin q \sin t \sin (G' + s) - \sin \delta \cos q \sin t \cos (G' + s) + \\ & + \sin \delta \cos q \cos t \sin (G' + s) \}. \end{aligned} \quad (9.114)$$

В формуле (9.114) произведем следующие замены: (a)

$$\begin{aligned} -(\sin q \cos t + \cos q \sin t \sin \delta) &= + \sin A \cos z, \\ -\sin q \sin t + \cos q \cos t \sin \delta &= -(\cos \varphi \sin z + \\ & + \sin \varphi \cos z \cos A). \end{aligned} \quad (б)$$

Подставив (a) и (б) в (9.114), полагая $s = s_{\text{cp}}$, будем иметь окончательно

$$\begin{aligned} \delta l_{\text{nut}} = & 15f' (\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{ctg} z \cos A) + \\ & + \frac{g'}{\sin z} \{ \sin A \cos z \cos (G' + s_{\text{cp}}) - \\ & - (\cos \varphi \sin z + \sin \varphi \cos z \cos A) \sin (G' + s_{\text{cp}}) \}. \end{aligned} \quad (9.115)$$

Поправки уравненных значений a' , x и y за влияние короткопериодических членов нутации в общем случае получим из решения системы нормальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} [P] \delta a'_{\text{nut}} + [Pb] \delta x_{\text{nut}} + [Pc] \delta y_{\text{nut}} + [P \delta l_{\text{nut}}] &= 0; \\ [Pb] \delta a'_{\text{nut}} + [Pbb] \delta x_{\text{nut}} + [Pbc] \delta y_{\text{nut}} + [Pb \delta l_{\text{nut}}] &= 0; \\ [Pc] \delta a'_{\text{nut}} + [Pbc] \delta x_{\text{nut}} + [Pcc] \delta y_{\text{nut}} + [Pc \delta l_{\text{nut}}] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.116)$$

При соблюдении условий симметричности в выборе звезд по азимутам и наблюдений их в узкой зоне по зенитному расстоянию из решения уравнений (9.116) получим

$$\left. \begin{aligned} \delta a'_{\text{nut}} &= -\frac{[P \delta l_{\text{nut}}]}{[P]}; \\ \delta x_{\text{nut}} &= -\frac{[Pb \delta l_{\text{nut}}]}{[Pbb]}; \\ \delta y_{\text{nut}} &= -\frac{[Pc \delta l_{\text{nut}}]}{[Pcc]}. \end{aligned} \right\} \quad (9.117)$$

Подставив в выражения (9.117) значения коэффициентов и свободных членов, будем иметь

$$\begin{aligned} \delta a'_{\text{nut}} = & -15f' \sin \varphi + g' \cos \varphi \sin (G' + s_{\text{cp}}) + \frac{15f' \cos \varphi}{n} \times \\ & \times \operatorname{ctg} z_{\text{cp}} [\cos A] - \frac{g' \cos (G' + s_{\text{cp}})}{n} \operatorname{ctg} z_{\text{cp}} [\sin A] + \\ & + \frac{g' \sin (G' + s_{\text{cp}}) \sin \varphi \operatorname{ctg} z_{\text{cp}}}{n} [\cos A], \end{aligned} \quad (9.118)$$

$$\begin{aligned} \delta x_{\text{nut}} = & g' \cos(G' + s_{\text{cp}}) + \frac{15f' \sin \varphi \operatorname{tg} z_{\text{cp}}}{[\sin^2 A]} [\sin A] - \\ & - \frac{15f' \cos \varphi}{[\sin^2 A]} [\sin A \cos A] + \frac{-g' \sin(G' + s_{\text{cp}}) \cos \varphi}{[\sin^2 A]} [\sin A] - \\ & - \frac{g' \sin(G' + s_{\text{cp}}) \sin \varphi}{[\sin^2 A]} [\sin A \cos A], \end{aligned} \quad (9.119)$$

$$\begin{aligned} \delta y_{\text{nut}} = & 15f' \cos \varphi + g' \sin \varphi \sin(G' + s_{\text{cp}}) - 15f' \sin \varphi \operatorname{tg} z_{\text{cp}} \frac{[\cos A]}{[\cos^2 A]} - \\ & - g' \cos(G' + s_{\text{cp}}) \frac{[\sin A \cos A]}{[\cos^2 A]} + \\ & + g' \cos \varphi \sin(G' + s_{\text{cp}}) \operatorname{tg} z_{\text{cp}} \frac{[\cos A]}{[\cos^2 A]}. \end{aligned} \quad (9.120)$$

Из выражений (9.118), (9.119) и (9.120) следует, что при условии соблюдения симметрии в выборе светил по азимутам поправки за влияние короткопериодических членов нутации будут

$$\delta a'_{\text{nut}} = -15f' \sin \varphi + g' \cos \varphi \sin(G' + s_{\text{cp}}), \quad (9.121)$$

$$\delta \varphi_{\text{nut}} = \delta x_{\text{nut}} = g' \cos(G' + s_{\text{cp}}), \quad (9.122)$$

$$\delta y_{\text{nut}} = 15f' \cos \varphi + g' \sin \varphi \sin(G' + s_{\text{cp}}). \quad (9.123)$$

Имея в виду, что $\delta y_{\text{nut}} = 15 \cos \varphi \delta \lambda_{\text{nut}}$, из формулы (9.123) получим поправку в долготу пункта в виде

$$\delta \lambda_{\text{nut}} = f' + \frac{1}{15} g' \operatorname{tg} \varphi \sin(G' + s_{\text{cp}}). \quad (9.124)$$

Поправки астрономических координат пункта за влияние короткопериодических членов нутации можно также получить исходя из следующих очевидных соображений. Из геометрии небесной сферы известно, что задача определения широты φ и времени s в некоторый момент сводится к определению экваториальных координат зенита Z места наблюдений в этот момент, так как

$$\varphi = \delta_z;$$

$$s = \alpha_z.$$

На этом основании формулы поправок за короткопериодические члены нутации (9.122) и (9.124) для момента $s_{\text{cp}} = \alpha_z$ можно получить непосредственно из выражений (9.111) независимо от применяемых способов определения географических координат, но с обязательным соблюдением указанных выше условий симметрии в выборе звезд, т. е.

$$\delta \varphi_{\text{nut}} = \delta \delta_{z_{\text{nut}}} = g' \cos(G' + s_{\text{cp}}), \quad (9.122')$$

$$\delta \lambda_{\text{nut}} = \delta \alpha_{z_{\text{nut}}} = f' + \frac{1}{15} g' \operatorname{tg} \varphi \sin(G' + s_{\text{cp}}), \quad (9.124')$$

где $\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \delta_z$.

Формулами (9.121)—(9.124) поправок за короткопериодические члены нутации можно пользоваться при обработке наблюдений, произведенных в течение короткого промежутка времени (2—4 ч).

Если производится совместное уравнивание наблюдений, выполненных в течение нескольких вечеров, без предварительного уравнивания по отдельным вечерам, то в этом случае необходимо учитывать поправки за короткопериодические члены нутации в видимых местах звезд, выбираемых из АЕ на момент наблюдения.

6. Приведение азимута направления к центрам геодезических знаков

Вопрос о приведении широты и долготы к центрам знаков был рассмотрен в главе 5.

Для приведения азимута направления к центрам знаков необходимо уравненное значение азимута исправить поправками за центрировку, редуцию и за сближение меридианов, т. е.

$$a = a_0 + \Delta c + \Delta r + \Delta \gamma. \quad (9.125)$$

Поправки за центрировку Δc и редуцию Δr ничем не отличаются от соответствующих поправок измеренных горизонтальных направлений геодезических сетей. Они вычисляются по известным из геодезии формулам

$$\Delta c'' = \rho'' \frac{l}{D} \sin \theta, \quad (9.126)$$

$$\Delta r'' = \rho'' \frac{l_1}{D} \sin \theta_1, \quad (9.127)$$

где l — линейный элемент центрировки, численно равный горизонтальному проложению расстояния IC между центром прибора I и центром данного пункта C ; θ — угловой элемент центрировки, численно равный углу, измеренному в точке I между направлениями на центр данного пункта C и наблюдаемого пункта B по ходу часовой стрелки; l_1 — линейный элемент редукции, численно равный горизонтальному проложению расстояния $B'B$ между центром визирной цели B' и центром B наблюдаемого знака; θ_1 — угловой элемент редукции, равный горизонтальному углу при точке B' между направлениями на центры знаков B и C , отсчитываемому по ходу движения часовой стрелки от направления $B'B$; D — горизонтальное проложение расстояния между центрами пунктов C и B .

Поправка в азимут за сближение меридианов. Сближением меридианов называется угол $\Delta \gamma$, выражающий непараллельность меридианов PI и PC (рис. 90). Для вывода формулы, определяющей этот угол, опустим сферический

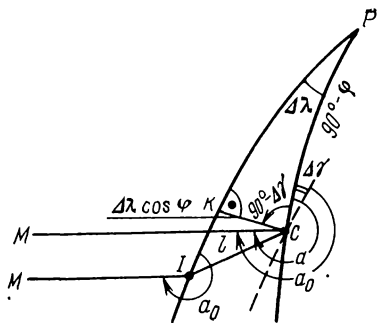


РИС. 93

перпендикуляр Ck из точки C на меридиан точки I . Длина этого перпендикуляра может быть получена из выражения

$$Ck = \Delta\lambda \cos \varphi.$$

Из прямоугольного сферического треугольника PkC по первому правилу Модюи — Непера имеем

$$\sin \Delta\gamma = \operatorname{tg} Ck \operatorname{tg} \varphi;$$

по малости величин $\Delta\gamma$ и Ck получим

$$\Delta\gamma = Ck \operatorname{tg} \varphi = \Delta\lambda \cos \varphi \operatorname{tg} \varphi = \Delta\lambda \sin \varphi. \quad (9.128)$$

Величина $\Delta\lambda$ на основании формулы (5.83) имеет вид

$$\Delta\lambda'' = \frac{\rho''}{N_0} l \sin a \sec \varphi.$$

Подставив это выражение в формулу (9.128), получим

$$\Delta\gamma = \frac{\rho''}{N_0} l \sin a_0 \operatorname{tg} \varphi. \quad (9.129)$$

При вычислениях с астрономическими таблицами (табл. 53 АТ) пользуются формулой

$$\Delta\gamma = \frac{l \sin a_0 \sin \varphi}{II}, \quad (9.130)$$

где $II = \frac{N_0}{\rho''} \cos \varphi$ выбирается из табл. 53 АТ по аргументу φ .

7. Поправка азимута за высоту наблюдаемого пункта над поверхностью эллипсоида (сфероидическая поправка)

Азимуты направлений, определенные на поверхности Земли, при обработке астрономо-геодезической сети исправляются поправкой Δa_c за высоту H_2 наблюдаемого пункта над поверхностью эллипсоида. Теория вопроса и вывод формулы, определяющей эту поправку, дается в курсе сфероидической геодезии. Формула имеет вид

$$\Delta a_c = \rho'' \frac{e^2}{2a} H_2 \cos^2 \varphi_1 \sin 2a', \quad (9.131)$$

где e и a — соответственно эксцентриситет и большая полуось земного эллипсоида; H_2 — высота наблюдаемого пункта над поверхностью эллипсоида, м; a' — азимут направления с пункта 1

на пункт 2, полученный из наблюдений; φ_1 — широта пункта 1 (пункта наблюдения).

Подставив в эту формулу значения e и a для эллипсоида Ф. Н. Красовского, получим

$$\Delta a''_c = 0,000109 H_2 \cos^2 \varphi_1 \sin 2a'. \quad (9.132)$$

Для вычисления сфероидической поправки можно воспользоваться табл. 50 АТ, из которой величины

$$g = 0,000109 H_2 \cos^2 \varphi_1$$

выбирают по аргументам φ_1 и H_2 .

Полагая $\varphi_1 = 45^\circ$, $a' = 45^\circ$ и $H_2 = 1$ км, получим $\Delta a''_c = 0,05''$. При тех же значениях φ_1 и a' для $H_2 = 5$ км $\Delta a''_c = 0,25''$.

8. Приведение азимута к «среднему полюсу» в системе МУН

Поправка астрономического азимута за приведение к «среднему полюсу» в системе МУН вычисляется по формуле

$$\Delta a_p = -(X \sin \lambda + Y \cos \lambda) \sec \varphi, \quad (9.133)$$

вывод которой дается в сферической астрономии [82].

В формуле (9.133) X и Y — координаты мгновенного полюса эпохи наблюдений, публикуемые в бюллетенях «Всемирное время»; φ и λ — широта и долгота пункта, долгота положительная к востоку от начального меридиана.

На основании уравнения Лапласа (9.48) поправка геодезического азимута, полученного из астрономических наблюдений, за приведение к Международному условному началу (МУН) будет

$$\Delta a_{r_p} = \Delta a_p - \Delta \lambda_p \sin \varphi.$$

Подставив в это выражение значение Δa_p из (9.133) и $\Delta \lambda_p$ из (5.88), получим

$$\Delta a_{r_p} = -(X \sin \lambda + Y \cos \lambda) \cos \varphi. \quad (9.133')$$

Таким образом, окончательное значение азимута направления с учетом поправок за приведение к центрам знаков, среднему полюсу и на поверхность эллипсоида будет

$$a_r = a_{0_r} + \Delta c + \Delta r + \Delta \gamma + \Delta a_{1_r} + \Delta a_c. \quad (9.134)$$

§ 67. О ТОЧНОСТИ АЗИМУТАЛЬНЫХ СПОСОБОВ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Оценка точности результатов астрономических определений азимутальными способами в общем виде может быть произведена по формулам (9.55)

$$m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{P_{a'}}}; \quad m_x = \frac{\mu}{\sqrt{P_x}}; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}},$$

Теодолит, метод наблюдений	Значения μ			Примечание
	Разные вертикалы, разные z	Разные вертика- лы, рав- ные z	Плоскость одного вертикала	
АУ 2"/10", контактный микрометр	1,5"	1,3"	1,0"	Данные различных источников близки между собой
«Глаз—ухо»	1,7	1,5	1,3	
Полярная, метод наведения	1,5	—	—	
У5", контактный микрометр	1,7	1,6	1,3	
«Глаз—ухо»	1,9	1,8	1,5	
Полярная, метод наведения	1,8	—	—	
Theo 010", «глаз—клавиша» (секундомер)	3,5—4,5"	3—4	2,5—3,5"	
Полярная, метод наведения	3—4	—	—	
ОТ—02 (без накладного уровня), «глаз—ухо»	4—5	—	—	

в которых веса уравненных величин представлены выражениями (9.64)—(9.66). Ожидаемое значение погрешности единицы веса μ для измеренного горизонтального направления и горизонтального угла, вычислены на основании формул (8.58) и (8.61)

Как указывалось в главе 9, на практике для более объективной оценки точности целесообразнее пользоваться значением погрешности единицы веса μ , полученным из опыта по формуле (9.54) в результате уравнивания больших рядов наблюдений.

Численные значения средней квадратической погрешности единицы веса μ для измеренного горизонтального угла Q , полученные из опыта определения геодезического азимута различными приборами и методами, представлены в табл. 64.

Из табл. 64 видно, что наиболее точные результаты определений получаются из наблюдений звезд в плоскости одного вертикала. Это и понятно, так как здесь наблюдения не связаны с отсчетами горизонтального лимба, вследствие чего из результатов наблюдений исключаются погрешности диаметров и погрешности отсчетов по горизонтальному лимбу. Некоторое уменьшение величины μ при наблюдениях звезд на равных высотах по сравнению с наблюдениями на разных объясняется тем, что при оценке точности по внутренней сходимости в способах равных высот не вскрывается влияние некоторых систематических инструментальных погрешностей, действующих на результаты измерений в функции зенитных расстояний светил (влияние погрешностей цапф, бокового гнуптия, систематических погрешностей в определении на-

клонности горизонтальной оси и т. д.). Из дальнейшего изложения будет видно (см. главу 11), что в способах определения φ и λ из наблюдений звезд на равных высотах удастся исключить влияние указанных систематических погрешностей и тем самым существенно повысить точность их определений.

На основании данных табл. 64 по формулам (9.55) можно подсчитать ожидаемые значения средних квадратических погрешностей определения азимута направления и составляющих уклонения отвесной линии (или широты и долготы) различными азимутальными способами.

Так, например, средняя квадратическая погрешность определения геодезического азимута из наблюдений звезд в разных вертикалах (при условии симметричного расположения звезд по азимутам) с помощью 2-секундного астрономического теодолита, снабженного контактными микрометром, будет

$$M_{a'} \approx M_{a_r} = \frac{\mu}{\sin z_{cp} \sqrt{n}}. \quad (9.135)$$

Полагая $z_{cp} = 65^\circ$, $n = 18$, получим

$$M_{a'} \approx M_{a_r} = \frac{1,5''}{0,9 \sqrt{18}} = 0,40''.$$

При тех же данных z_{cp} и n средняя квадратическая погрешность определения азимута из наблюдений звезд в вертикале предмета (без отсчетов горизонтального лимба) будет

$$M_{a'} \approx M_{a_r} = \frac{1,0''}{0,9 \sqrt{18}} = 0,26''.$$

Для совместных определений геодезического азимута и составляющих уклонения отвесной линии из наблюдений звезд, равномерно расположенных по сторонам горизонта (или вблизи плоскостей двух произвольных взаимно перпендикулярных вертикалов), будем иметь

$$\left. \begin{aligned} M_{a'} \approx M_{a_r} &= \frac{\mu}{\sin z_{cp} \sqrt{n}}; \\ M_x \approx M_\xi &= \frac{\mu}{\cos z_{cp} \sqrt{[\sin^2 A]}}; \\ M_y \approx M_\eta &= \frac{\mu}{\cos z_{cp} \sqrt{[\cos^2 A]}}. \end{aligned} \right\} \quad (9.136)$$

Имея в виду, что при равномерном расположении звезд по азимутам $[\sin^2 A] = [\cos^2 A] = \frac{n}{2}$, а также полагая $z_{cp} = 35,3^\circ$ и $n = 36$, получим

$$M_{a'} \approx M_{a_r} = \frac{1,5''}{0,58\sqrt{36}} = 0,43'';$$

$$M_x \approx M_\xi = \frac{1,5''}{0,82\sqrt{18}} = 0,43'';$$

$$M_y \approx M_\eta = \frac{1,5''}{0,82\sqrt{18}} = 0,43'';$$

$$M_\lambda = \frac{0,43''}{15} \sec \varphi = 0,03^s \sec \varphi.$$

При тех же данных z и n для совместных определений, выполненных в вертикале местного предмета и перпендикулярно к нему (без отсчетов горизонтального лимба), будем иметь

$$M_{a'} \approx M_{a_r} = \frac{1,0''}{0,58\sqrt{36}} = 0,29'';$$

$$M_x \approx M_\xi = \frac{1,0''}{0,82\sqrt{18}} = 0,29'';$$

$$M_y \approx M_\eta = \frac{1,0''}{0,82\sqrt{18}} = 0,29'';$$

$$M_\lambda = \frac{M_y}{15} \sec \varphi = 0,02^s \sec \varphi;$$

$$M_a = \sqrt{M_{a'}^2 + M_y^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} = 0,29'' \sec \varphi.$$

Средняя квадратическая погрешность определения составляющей x (ξ) из наблюдений звезд в первом вертикале, расположенных симметрично относительно зенита, вычислится по формуле

$$M_x \approx M_\xi = \frac{\mu}{\cos z_{cp} \sqrt{n}}, \quad (9.137)$$

Полагая для наблюдений методом «глаз — ухо» $\mu = 1,3''$ $z_{cp} = 15^\circ$, $n = 24$, получим

$$M_x = M_\varphi \approx M_\xi = \frac{1,3''}{0,97\sqrt{24}} = 0,27''.$$

Для наблюдений одной пары звезд ($n = 2$) будем иметь

$$M_\lambda = M_\varphi \approx M_\xi = \frac{1,3''}{0,97\sqrt{2}} = 0,95''.$$

Средняя квадратическая погрешность определения составляющей y (η) для наблюдений звезд в меридиане, расположенных симметрично относительно зенита, вычислится по формуле

$$M_y \approx M_\eta = \frac{\mu}{\cos z_{\text{cp}} \sqrt{n}}. \quad (9.138)$$

Полагая для наблюдений астрономическим теодолитом с контактным микрометром $\mu = 1,0''$, $z_{\text{cp}} = 15^\circ$, $n = 24$, получим

$$M_y = M_\eta = \frac{1,0''}{0,97 \sqrt{24}} = 0,21'';$$

$$M_{\lambda'} = \frac{M_y}{15} \sec \varphi = 0,014^s \sec \varphi.$$

При таких же данных для пары звезд ($n = 2$) будем иметь

$$M_y = M_\eta = \frac{1,0''}{0,97 \sqrt{2}} = 0,73'';$$

$$M_{\lambda'} = \frac{M_y}{15} \sec \varphi = 0,049^s \sec \varphi.$$

Подобным образом можно рассчитать ожидаемую точность определений искомых величин любым азимутальным способом.

ГЛАВА 10

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА, ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ СВЕТИЛ В РАЗНЫХ ВЕРТИКАЛАХ И НА РАЗНЫХ ЗЕНИТНЫХ РАССТОЯНИЯХ

Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений светил в разных вертикалах и на разных зенитных расстояниях по точности определений несколько уступают соответствующим способам из наблюдений светил на равных высотах или в плоскости одного вертикала. Однако способы этой группы являются наиболее гибкими по исполнению наблюдений. Они основаны, как правило, на многократных наблюдениях ярких звезд, что обеспечивает их успешное применение в тяжелых метеорологических условиях и в условиях незаходящего Солнца. Вследствие этого способы данной группы являются наиболее целесообразными при выполнении работ в высоких широтах в период Полярного дня.

Возможность дневных астрономических определений по наблюдениям ярких звезд в высоких широтах известна. При сравнительно низкой высоте Солнца в условиях Полярного дня с помощью светосильных переносных приборов оказывается возможным наблюдать звезды до 3,0—3,5 звездной величины. Таких звезд в Астрономическом Ежегоднике СССР имеется около 130. Из них доступны для наблюдений в любой час дня под различными азимутами и высотами 50—60 звезд. Этого количества звезд оказывается вполне достаточно для успешного применения способов данной группы. Для практического применения этих способов в МИИГАиК составлена программа для вычисления суточных эфемерид ярких звезд на ЭВМ БЭСМ-4М с табличным интервалом, обеспечивающим линейное интерполирование z и A на момент наблюдения s с точностью 2—3'.

При многократных наблюдениях ярких звезд вблизи меридиана и первого вертикала можно пользоваться средними местами звезд любого каталога и «Эфемеридами для наблюдений звезд в первом вертикале». Пользуясь указанными эфемеридами и дифференциальными изменениями зенитного расстояния и азимута, можно уверенно находить звезды днем, в угловых удалениях от данных вертикалов до 10—15°.

**§ 68. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА,
ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ СВЕТИЛ
В РАЗНЫХ ВЕРТИКАЛАХ
И НА РАЗНЫХ ЗЕНИТНЫХ РАСТОЯНИЯХ**

1. Теоретические основы способа

На основании теории, изложенной в главе 9, для совместного определения азимута широты и долготы измеряются горизонтальные углы Q_i между светилами и местным предметом. В соответствии с выгоднейшими условиями светила выбираются для наблюдений на среднем расстоянии 35° ($20^\circ < z < 50^\circ$), при равномерном их расположении по азимутам. Выбор ярких звезд для наблюдений днем производится с помощью указанных выше эфемерид, для наблюдений ночью — визуально, с последующим их опознаванием с помощью звездной карты и номограммы к ней (см. прил. 3 и 4).

Азимут, широта и долгота могут быть получены способом совместного определения из наблюдений минимум трех звезд ($n = 3$). В главе 9 было показано, что для определения геодезического азимута и составляющих уклонения отвесной линии с помощью 2-секундного астрономического теодолита, снабженного контактными микрометром, со средней квадратической погрешностью

$$M_{a_r} = M_{\xi} = M_{\eta} = 0,4''$$

необходимо выполнить наблюдения не менее 36 звезд, равномерно расположенных по азимутам.

Эти наблюдения могут быть выполнены в течение нескольких вечеров.

Периодически, не реже чем через 2 ч в каждый вечер наблюдений, производится прием радиосигналов точного времени. При наблюдениях с кварцевым хронометром интервал между приемами радиосигналов может быть увеличен до 3—4 ч.

При обработке наблюдений с условными координатами φ_0 и λ_0 для каждого светила составляется уравнение поправок вида (9.39). При этом условный азимут светила вычисляется со средним моментом T_{H_i} наблюдения светила в приеме и исправляется поправкой за ускорение.

При вычислениях с геодезическими координатами пункта B и L для каждого светила составляется уравнение поправок вида (9.45).

Для вычисления коэффициентов и весов уравнений поправок, а также поправок в измеряемые направления (за наклон горизонтальной оси, погрешности цапф, за влияние суточной абберации, ускорение движения звезд по азимуту и т. д.) в каждом приеме измеряется грубо, с точностью 2—3', зенитное расстояние светила z_i . Такие измерения освобождают от утомительных при

ручном счете вычислений зенитных расстояний светил по известным часовым углам. При вычислениях на ЭВМ измерение зенитных расстояний светил производить не нужно.

Из совместного решения n уравнений поправок (9.39) по методу наименьших квадратов получают вероятнейшие значения a' , x и y . Далее, на основании выражений (9.50) и (9.51), от условных значений азимута и составляющих уклонений отвесной линии переходят к геодезическому азимуту направления a_r и астрономо-геодезическим составляющим уклонения отвесной линии ξ и η . В случае необходимости по формулам (9.41) и (9.42) можно вычислить астрономический азимут направления a и астрономические координаты пункта φ и λ .

При вычислениях с известными геодезическими координатами пункта B и L из совместного решения n уравнений поправок (9.45) по методу наименьших квадратов сразу получают уравненные значения геодезического азимута a_r и астрономо-геодезических составляющих уклонения отвесной линии ξ и η .

Оценка точности уравненных значений неизвестных производится по формулам (9.54)—(9.62).

Для точных определений a_r , ξ и η (λ) необходимо производить определение лично-инструментальной разности наблюдателя на основном пункте и учитывать эту разность в результатах полевых определений долгот (составляющей η) и азимутов направлений по формулам (9.106)—(9.110). Определение лично-инструментальной разности на основном пункте необходимо, вообще говоря, производить по той же методике, которая применяется при определении полевых пунктов. Однако, имея в виду что лично-инструментальное уравнение определяется как разность $\partial\lambda = \lambda_{\text{осн}} - \lambda'_{\text{осн}}$, то для ее вывода целесообразно применить способы определения долготы по измеренным горизонтальным направлениям на светила вблизи меридиана, сохранив принципиально такую же методику наблюдений, как и в данном способе.

2. Наблюдения

Наблюдения с указанной выше точностью выполняются 2-секундным астрономическим теодолитом с контактным микрометром.

Для исключения остаточного влияния наклона подвижной вертикальной нити применяется позиционное устройство (например, ДКМ-3А) или механизм для вращения трубы по высоте. Конструкция механизма такая же, как и для вращения теодолита по азимуту. Механизм крепится к подставке трубы, несущей наводящий винт. Необходимая скорость вращения трубы по высоте подбирается путем изменения величины напряжения, подаваемого на моторчик, так чтобы движение видимого изображения звезды в поле зрения трубы происходило параллельно средней горизонтальной нити. Перед выездом на полевые работы производятся исследования теодолита в соответствии с требованиями Инструкции к азимутальным определениям.

Общий порядок наблюдений состоит из:
приема радиосигналов времени,
измерений горизонтальных углов между светилами и местным предметом,
вторичного приема радиосигналов времени.

Порядок измерения горизонтального угла Q между светилом и местным предметом в каждом приеме следующий:

а) Наблюдение местного предмета при КЛ (КП):

три наведения подвижной нитью контактного микрометра на местный предмет с соответствующими отсчетами по микрометру; отсчеты горизонтального лимба;

наведения подвижной нитью на земной предмет производятся вблизи нуль-пункта гребенки, так чтобы абсолютное значение отсчетов по микрометру не превышало 10—15 делений. Если зенитное расстояние земного предмета отличается от 90° более чем на 1° , то определяется наклон горизонтальной оси по отсчетам накладного уровня.

б) Наблюдение звезды при КЛ (КП):

выбор звезды и наведение трубы на звезду (при работе без эфемерид производится визуально, при наличии эфемерид установка прибора по z и A производится за 3—4^м до момента s);

включение механизма вращения трубы по высоте и подбор необходимой величины подаваемого напряжения на моторчик; скорость вращения трубы по высоте должна быть такой, чтобы видимое движение звезды происходило параллельно средней горизонтальной нити и вблизи от нее; корректировка положения теодолита по азимуту (с помощью наводящего винта алидады) и по высоте (с помощью корректировочного винта механизма вращения);

отсчеты накладного на горизонтальную ось уровня и перекладка его;

включение хронографа и наблюдение прохождения звезды на двух — трех центральных оборотах винта контактного микрометра;

отсчеты накладного уровня;

отсчеты горизонтального лимба;

отсчеты вертикального лимба с точностью $1'$;

в) Перевод трубы через зенит и установка по отсчитанному зенитному расстоянию для положения КП (КЛ);

поворот верхней части теодолита на 180° с учетом упреждения по азимуту и наведение трубы на ту же звезду.

г) Наблюдение звезды при КП (КЛ) в порядке, указанном в пункте б; при этом величина напряжения, подаваемого на моторчик, остается такой же, как и для первого положения прибора; для исключения влияния параллакса марок (перьев) хронографа запись моментов контактирования при втором положении прибора производится с переключением соленоидов хронографа.

Пример совместного определения геодезического
из наблюдений звезд

Журнал

10.7.1975 г.
 $s = 15^{\text{h}}50^{\text{m}}$
 $z_{\text{ср}} = 44^{\circ} 52'$
 $\text{ctg } z_{\text{ср}}^* = 1,0047$
 $\text{csc } z_{\Delta} = 1,000$
 $\text{csc } z_{\text{ср}}^* = 1,4175$

Пункт Комсомольский

Прием 1

Звезда № 277

$$\frac{\tau}{2} \text{ctg } z_{\text{ср}}^* = 0,866'' \quad \frac{\tau}{2} = 0,862''$$

$$\mu \text{csc } z_{\Delta} = 0,9647 \quad \mu = 0,9647''$$

$$\frac{R}{2} (-\text{Шк} - \text{Мх}) = -0,60''$$

азимута и составляющих уклонения отвесной линии
в разных вертикалах

наблюдений

Теодолит ДКМ-3А № 87990

Хронометр № 4074

Хронограф ХМП № 1123

$$b^{\partial/2} = \frac{(L + \Pi)_0 - (L + \Pi)}{2} \Delta M_L = + (m_L - 10) \mu \text{csc } z$$

$$\Delta M_R = - (m_R - 10) \mu \text{csc } z$$

$$\frac{R}{2} (-\text{Шк} - \text{Мх}) \text{csc } z_{\text{ср}}^* = -0,85''$$

Объект наблюдения	Окулярный микрометр	Хронометр $T_{L, R}$	Уровень	
п. Реутово Фонарь	$10^{\text{о}}630,3^{\text{д}}$ 32,1 32,1	$15^{\text{h}}47^{\text{m}}28,36^{\text{с}}$ 32,02	КЛ 27,0-14,3 27,0-14,3	
	$\frac{10 \quad 31,5}{-10}$ $(M_L - 10) = +31,5$			
Звезда № 277		$15^{\text{h}}47^{\text{m}}28,36^{\text{с}}$ 32,02	27,0-14,3 27,0-14,3	
				37,64 42,08 47,63 56,86
				48 02,11 06,63 11,72
				$(L + \Pi)_0 = 41,30$ $b = -7,02^{\partial/2}$
Звезда № 277*		$T_L = 15^{\text{h}}47^{\text{m}}49,45^{\text{с}}$ $15^{\text{h}}53^{\text{m}}22,88^{\text{с}}$	КП 21,3-34,1 21,3-34,0 21,30-34,05	
		27,42 32,62 37,07 44,44 50,96 54,46 59,77 54 03,80		
		$(L + \Pi) = 55,35$		
		$T_R = 15^{\text{h}}53^{\text{m}}43,71^{\text{с}}$		
п. Реутово Фонарь	$10^{\text{о}}630,3^{\text{д}}$ 30,3 29,8	$T_H = 15^{\text{h}}50^{\text{m}}46,58^{\text{с}}$ $\Delta T = 2^{\text{m}}57,13^{\text{с}} = 177,1^{\text{с}}$ $5,454 \left(\frac{\Delta T}{100}\right)^2 = 17,11''$		
	$\frac{10^{\text{о}}630,0^{\text{д}}}{-10}$ $(10 - M_R) = -30,0$			

Горизонтальный лимб	Поправки $\Delta M_{L, R}, \Delta N$	Горизонтальные направления	Примечание (вертикальный лимб)
$225^{\circ} 12' 28,8''$ 29,2	$\Delta M_L = +30,39''$	$225^{\circ} 12' 59,39''$	$z_{\Delta} = 80^{\circ} 15'$ $z_L^* = 44^{\circ} 41'$
$225^{\circ} 12' 29,00''$			
$311^{\circ} 55' 16,8''$ 17,0	$\Delta N''_b = -6,08''$	$N' = 312^{\circ} 05' 55,32''$	$z_{\text{ср}}^* = 44^{\circ} 52'$ $z_R^* = 45^{\circ} 03'$
$311^{\circ} 55' 16,90''$			
$\frac{1}{2} [L + (R \pm 180^{\circ})]$			
$312^{\circ} 06' 01,40''$			
$132^{\circ} 16' 45,8''$ 46,0	$\Delta M_R = -28,94''$	$cq = 0,00''$ $N = 312^{\circ} 05' 55,32''$	
$132^{\circ} 16' 45,95''$			
$45^{\circ} 13' 30,4''$ 30,5			
$45^{\circ} 13' 30,45''$	$2c = -2,12''$	$45^{\circ} 13' 01,51''$	
	$M = 225^{\circ} 13' 00,45''$ $N = 312^{\circ} 05' 55,32''$ $Q' = 273^{\circ} 07' 05,13''$		

д) Наблюдение местного предмета при КП (КЛ) в порядке, указанном в пункте а.

При наблюдениях с контактным микрометром, имеющим позиционное устройство фирмы Керн (ДКМ-ЗА), общий порядок наблюдений в приеме остается таким же. Однако при наблюдениях звезд возникают особенности, связанные с исключением влияния остаточного наклона вертикальной подвижной нити контактного микрометра. Это влияние будет исключено, если для каждого положения теодолита след видимого движения звезды пройдет через центр поля зрения трубы. Наблюдение звезды в этом случае выполняется в следующем порядке. Пользуясь заранее составленными эфемеридами, прибор устанавливают по z и A данной звезды за 2—3 мин до эфемеридного момента s . При подходе изображения звезды к кругу позиционных углов вращением наводящих винтов трубы и алидады добиваются такого положения, чтобы звезда прошла под углом q к горизонтальной нити.

После этого вращение наводящих винтов трубы и алидады прекращают. Подвижную нить микрометра ставят на 1,5 оборота от нуль-пункта гребенки навстречу видимому движению звезды. Далее производят отсчеты накладного уровня (уровень в теодолите ДКМ-ЗА не перекаладывается), наблюдают прохождение звезды на трех оборотах винта контактного микрометра, отсчитывают горизонтальный лимб и приближенно вертикальный лимб. В таком же порядке производят наблюдение звезды при втором положении прибора.

Так как радиальные штрихи градусов позиционного устройства теодолита ДКМ-ЗА имеют сравнительно большую длину, то не составляет большого труда вращением наводящего винта трубы подобрать такое положение трубы по высоте, при котором видимое изображение звезды смещалось бы параллельно одному из штрихов шкалы.

Таким образом, можно обойтись без предвычисления параллактических углов q , а устанавливать их «эмпирически» при наблюдениях звезд.

Для записей наблюдений удобна форма журнала, применяемого при определениях азимута по часовому углу Полярной. Выписка из журнала наблюдений приведена в табл. 65.

3. Обработка наблюдений

Обработка наблюдений состоит из:

- обработки приемов радиосигналов времени;
- расшифровки хронографической ленты;
- обработки журнала наблюдений;
- вычисления свободных членов уравнений поправок;
- составления и решения нормальных уравнений;
- вывода уравненных значений a_r , φ и λ (ξ и η);
- оценки точности полученных результатов.

а) Обработку приема радиосигналов времени выполняют по общей для всех способов методике, изложенной в главе 2.

Из приемов радиосигналов времени каждых двух соседних станций с условной долготой пункта λ_0 определяют поправку хронометра u_0 в момент $X = \frac{X_1 + X_2}{2}$ и часовой ход хронометра ω .

Если известны геодезические координаты пункта, то из приемов сигналов времени с геодезической долготой пункта вычисляют поправку хронометра u_r в момент X .

б) Расшифровка хронографической ленты выполняется с помощью дешифровочного прибора ЦНИИГАиК или клиновой палетки точно так же, как в зенитальных способах. При работе с контактным микрометром, имеющим 9 или 10 контактов, вполне достаточно брать в обработку один оборот микрометра, располагающийся симметрично относительно нуля-пункта гребенки.

В пределах указанного оборота производится разметка секунд, т. е. расшифровка хронографической ленты, результаты которой записываются в журнал наблюдений (см. табл. 65).

в) Обработка журнала наблюдений выполняется в следующем порядке (см. табл. 65).

Подсчитываются средние моменты наблюдения звезды для каждого положения прибора (КЛ и КП):

$$T_{L,R} = \frac{\sum T_{L_i,R_i}}{n},$$

а также средний момент наблюдения звезды в приеме по формуле

$$T_H = \frac{T_L + T_R}{2}.$$

Одновременно подсчитываются величины

$$\Delta T = T_H - T_{L,R} \text{ и } 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2,$$

необходимые для вычисления поправки азимута звезды за ускорение; вычисляются значения горизонтальных направлений на местный предмет M и светило N . Для этого в журнале подсчитываются средние значения отсчетов по горизонтальному лимбу, средние значения отсчетов окулярного микрометра при наблюдениях местного предмета, средние значения наклонов горизонтальной оси по отсчетам накладного уровня, зенитное расстояние светила для положений прибора КЛ и КП (с точностью 1').

Если сумма гуп обоих микроскопов-микрометров превышает $0,5^g$, то средние отсчеты горизонтального лимба исправляются поправками за гуп.

Средние значения измеренных направлений на местный предмет и звезду вычисляются по формуле (8.24) с дополнительным учетом поправки за влияние погрешностей цапф по формуле (8.39). Поправка за наклон горизонтальной оси при вычислении направления на местный предмет учитывается в том случае, если

зенитное расстояние местного предмета отличается от 90° более чем на 1° .

Если определение наклона горизонтальной оси в каждом полуприеме производилось без перекладки уровня, то среднее значение горизонтального направления исправляется поправкой за средний наклон по формуле

$$\Delta N_{b_{cp}} = \frac{(Л + П)_0 - 0(Л + П)}{2} \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_{cp}. \quad (10.1)$$

Для вычисления поправки горизонтального направления на звезду за остаточное влияние коллимации по формуле

$$\Delta N_c = \frac{c^*}{2} (\operatorname{cosec} z_R - \operatorname{cosec} z_L) = cq, \quad (10.2)$$

где

$$q = \frac{1}{2} (\operatorname{cosec} z_R - \operatorname{cosec} z_L),$$

величина и знак коллимационной ошибки c устанавливается из наблюдений двух, трех звезд на основании выражения

$$c^* = \frac{(A'_L - A'_R) - [N'_L - (N'_R \pm 180^\circ)]}{\operatorname{cosec} z_L + \operatorname{cosec} z_R}, \quad (10.3)$$

в котором A'_L и A'_R — значения азимутов светила, вычисленные отдельно для КЛ и КП; N'_L и N'_R — значения горизонтальных направлений на светило при КЛ и КП, с учетом поправок за наклон горизонтальной оси.

Так как при наблюдениях звезд величина

$$q = \frac{1}{2} (\operatorname{cosec} z_R - \operatorname{cosec} z_L)$$

всегда мала, то для вычисления поправки

$$\Delta N_c = cq$$

значение самой коллимации c достаточно знать приближенно, с точностью до нескольких секунд дуги.

На этом основании численное значение и знак коллимационной ошибки c для положения подвижной нити контактного микрометра на среднем контакте оборота винта, принимаемого в обработку, можно также установить из наблюдений местного предмета. Для этого достаточно установить подвижную нить микрометра в указанное положение и произвести наблюдение местного предмета при КЛ и КП. Тогда

$$c = \frac{L_\Delta - (R_\Delta \pm 180^\circ)}{2}.$$

После вывода горизонтальных направлений M_i и N_i в журнале вычисляется значение горизонтального угла Q'_i по формуле

$$Q'_i = M_i - N_i.$$

г) Вычисление свободных членов уравнений поправок производится с условными или геодезическими координатами пункта по формулам

$$l_i = [a_0 - (A'_{0i} + \sum \delta A_i)] - Q'_i, \quad (9.39')$$

$$l_{r_i} = [a_0 - (A'_{r_i} + \sum \delta A_i)] - Q'_i, \quad (9.45')$$

в которых

$$A'_{0i} = \text{arcctg}(\sin \varphi_0 \text{ctg } t_{0i} - \cos \varphi_0 \text{tg } \delta_i \text{cosec } t_{0i}),$$

$$A'_{r_i} = \text{arcctg}(\sin B \text{ctg } t_{r_i} - \cos B \text{tg } \delta_i \text{cosec } t_{r_i}),$$

$$t_{0i} = T_{H_i} + u_0 + \omega(T_{H_i} - X) - \alpha_i,$$

$$t_{r_i} = T_{H_i} + u_r + \omega(T_{H_i} - X) - \alpha_i,$$

$$\sum \delta A_i = \delta A_i + \Delta A_{W_i} + \Delta A_{(\text{Шк-Мх})}.$$

Поправки за влияние суточной абберации δA_i , за ускорение движения звезд ΔA_{W_i} , за ширину контактов и мертвый ход $\Delta A_{\text{Шк-Мх}}$ вычисляются соответственно по формулам (9.89), (9.95) и (9.97). *Пример вычисления свободного члена уравнения поправок с геодезическими координатами пункта приведен в табл. 66.

Т а б л и ц а 66

Вычисление свободных членов уравнений поправок

Пункт: Комсомольский, $B = 44^\circ 58' 32,28''$ $L = 3^h 16^m 35,295^s$

Направление: Комсомольский—Реутово, $a_0 = 225^\circ 14' 10''$

Геодолит: ДКМ-3А № 87990

Дата: 10.7.1975 г.

$$\sin B = 0,706806$$

$$\cos B = 0,707407$$

Обозначения	Звезда № 277	Обозначения	Звезда № 277
T_H	$15^h 50^m 46,58^s$	ΔA_W	$+6,48''$
u_r	$+38,58$	$\frac{R}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) \text{csc } z$	$-0,85$
$\omega (T_H - X)$	$+0,02$	Q'_i	$273 \ 07 \ 05,13$
s	$15 \ 51 \ 25,18$	a'_r	$225 \ 14 \ 06,32$
α	$10 \ 59 \ 44,17$	a_0	$225 \ 14 \ 00,00$
t_r^h	$4 \ 51 \ 41,01$	l	$+3,68''$
t_r°	$72^\circ 55' 15,15''$	$\sin A'_r$	$-0,7418$
δ	$56 \ 34 \ 25,60$	$\sin 2A_r$	$-0,9949$
$\text{tg } \delta$	$1,515071$	$\frac{d^2 A}{dt^2} = k_1 \sin A_r -$	$+0,3787$
$\text{ctg } t_r$	$0,307242$	$-k_2 \sin 2A_r$	
$\text{csc } t_r$	$1,046134$	$\Delta A_W = 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100}\right)^2 \times$	$+6,48''$
$\sin B \text{ctg } t_r$	$0,217160$	$\times \frac{d^2 A}{dt^2}$	
$\cos B \text{tg } \delta \text{csc } t_r$	$1,121217$		
$\text{ctg } A'_r$	$-0,904057$		
A'_r	$312^\circ 06' 55,34''$		
$\delta A_r = \frac{0,32'' \cos B \cos A'_r}{\sin z}$	$+0,22$		

Совместное определение геодезического азимута и составляющих уклонения отвесной линии
из наблюдений звезд в разных вертикалах

Пункт: Комсомольский $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,00''$ $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$
 $B = 44^\circ 58' 32,28'' \pm 0,03''$ $L = 3^h 16^m 35,295^s \pm 0,002^s$
 Предварительный азимут направления Комсомольский—Нагорное
 $a_0 = 333^\circ 15' 50,00''$

У р а в н е н и я п о п р а в о к

Дата	Номер звезды	m	A	z	P	a	b	c	l	s	v
17.8.1975	186	1,9	108,9°	49,5°	0,58	1	-0,804	-0,276	+3,14	+3,060	-0,71
17.8.1975	190	-1,6	145,4	68,8	0,87	1	-0,221	-0,320	+3,66	+4,119	-0,65
17.8.1975	142	0,3	175,6	53,4	0,64	1	-0,056	-0,743	+7,76	+7,861	+2,78
17.8.1975	21	2,2	316,8	30,7	0,26	1	+1,166	+1,242	+4,31	+7,718	+1,05
17.8.1975	119	1,1	217,7	33,3	0,30	1	+0,930	-1,203	+3,18	+3,907	-3,09
17.8.1975	506	1,3	56,5	57,2	0,71	1	-0,533	+0,352	+3,57	+4,389	+0,35
18.8.1975	119	1,0	240,9	42,1	0,46	1	+0,939	-0,522	+8,55	+9,967	+3,15
18.8.1975	21	2,2	316,5	40,8	0,42	1	+0,802	+0,846	+2,27	+4,918	-1,25
18.8.1975	148	1,7	226,2	48,0	0,55	1	+0,652	-0,625	+3,78	+4,807	-1,55
19.8.1975	21	2,2	24,5	66,6	0,84	1	-0,179	+0,392	+1,86	+3,073	-1,56
19.8.1975	316	1,7	47,5	47,3	0,54	1	-0,682	+0,624	+4,02	+4,962	+1,26
19.8.1975	278	1,9	356,2	17,0	0,09	1	+0,218	+3,261	+1,78	+6,259	+1,81
[P] = + 6,26									[Pv ²] = 18,562		

1. Нормальные уравнения

	l	b]	c]	l]	s]
[P	+6,260	+6,138	+0,029	+25,440	+31,867
[Pb		+2,426	-0,265	+2,485	+4,784
[Pc			+3,347	-4,132	-1,021
[Pl]				+128,392	+152,185
Контроль	-26,061	-1,517	+3,786	+23,793	-23,792

2. Стандартные формулы для вычисления неизвестных

$$\Delta a' = \frac{\Delta'_a}{\Delta}, \quad x = \frac{\Delta x}{\Delta}, \quad y = \frac{\Delta y}{\Delta}, \quad (9.53)$$

где

$$\Delta = [P] \Delta_{11} - [Pb] \Delta_{12} + [Pc] \Delta_{13},$$

$$\Delta a' = - \{ [Pl] \Delta_{11} - [Pbl] \Delta_{12} + [Pcl] \Delta_{13} \},$$

$$\Delta x = - \{ [Pc] \Delta_{x_{31}} - [Pbc] \Delta_{x_{32}} + [Pcc] \Delta_{x_{33}} \},$$

$$\Delta y = - \{ -[Pb] \Delta_{x_{31}} + [Pbb] \Delta_{x_{32}} - [Pbc] \Delta_{x_{33}} \},$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} [Pbb] & [Pbc] \\ [Pbc] & [Pcc] \end{vmatrix}, \quad \Delta_{12} = \begin{vmatrix} [Pb] & [Pc] \\ [Pbc] & [Pcc] \end{vmatrix}, \quad \Delta_{13} = \begin{vmatrix} [Pb] & [Pc] \\ [Pbb] & [Pbc] \end{vmatrix}.$$

$$\Delta_{x_{31}} = \begin{vmatrix} [Pb] & [Pbl] \\ [Pc] & [Pcl] \end{vmatrix}, \quad \Delta_{x_{32}} = \begin{vmatrix} [P] & [Pl] \\ [Pc] & [Pcl] \end{vmatrix}, \quad \Delta_{x_{33}} = \begin{vmatrix} [P] & [Pl] \\ [Pb] & [Pbl] \end{vmatrix}.$$

Для нашей системы нормальных уравнений имеем:

$$\Delta_{11} = + 8,0496, \quad \Delta_{x_{31}} = - 0,6423, \quad \Delta = + 50,3226$$

$$\Delta_{12} = + 0,4696, \quad \Delta_{x_{32}} = - 26,6041, \quad \Delta a' = - 204,0569$$

$$\Delta x = - 33,2473$$

$$\Delta_{13} = - 0,1070, \quad \Delta_{x_{33}} = + 12,0454, \quad \Delta y = + 61,2609$$

$$\Delta a' = \frac{- 204,0569}{50,3226} = - 4,055'', \quad x = \frac{- 33,2473}{50,3226} = - 0,66''$$

$$y = \frac{61,2609}{50,3226} = + 1,217''.$$

3. Стандартные формулы для оценки точности
а) средняя квадратическая погрешность единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{n-k}}, \quad (9.54)$$

где

$$[Pv^2] = [Pl] + [Pl] \Delta a' + [Pbl] x + [Pcl] y.$$

Для нашего примера

$$[Pv^2] = 128,392 - 103,159 - 1,640 - 5,041 = 18,552$$

$$\mu = 1,43''$$

б) Средние квадратические погрешности уравненных значений неизвестных

$$m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{P_{a'}}}; \quad m_x = \frac{\mu}{\sqrt{P_x}}; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}} \quad (9.55)$$

$$P_{a'} = \frac{\Delta}{\Delta_{11}}; \quad P_x = \frac{\Delta}{\Delta_{22}}; \quad P_y = \frac{\Delta}{\Delta_{33}} \quad (9.57)$$

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} [Pbb] & [Pbc] \\ [Pbc] & [Pcc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} [P] & [Pc] \\ [Pc] & [Pcc] \end{vmatrix}; \quad \Delta_{33} = \begin{vmatrix} [P] & [Pb] \\ [Pb] & [Pbb] \end{vmatrix}. \quad (9.58)$$

Для нашего примера имеем:

$$\Delta_{11} = +8,049 \quad \Delta_{22} = +20,9519 \quad \Delta_{33} = +15,1678$$

$$P_{a'} = \frac{50,3226}{8,0496} = 6,252 \quad P_x = \frac{50,3226}{20,9519} = 2,402$$

$$P_y = \frac{50,3226}{15,1678} = 3,318$$

$$m_{a'} = \frac{1,43''}{\sqrt{6,252}} = 0,57'', \quad m_x = \frac{1,43''}{\sqrt{2,402}} = 0,92''$$

$$m_y = \frac{1,43''}{\sqrt{3,318}} = 0,78''.$$

4. Уравненные значения искомых величин

1. Уравненные значения искомых величин

$$a' = a_0 + \Delta a' = 333^\circ 16' 50,00'' - 4,06'' = \\ = 333^\circ 16' 45,94''; \quad m_{a'} = 0,57''.$$

2. Геодезический азимут этого же направления

$$a_{\Gamma} = a' - 15(\lambda_0 - L) \sin B + \frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} z_{\Delta}},$$

$$\lambda_0 - L = -0,795^s, \quad 15(\lambda_0 - L) \sin B = -8,43'',$$

$$\eta_0 = 15(\lambda_0 - L) \times \cos B = -8,44'';$$

$$\frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} z_{\Delta}} = -0,03'', \quad \xi_0 = \varphi_0 - B = +7,72'', \quad \operatorname{tg} z_{\Delta} = 149,47;$$

$$a'_{\Gamma} = 333^\circ 16' 45,94'' + 8,43'' - 0,03'' = 333^\circ 16' 54,34''; \quad m_{a_{\Gamma}} = 0,57''.$$

3. Астрономо-геодезические составляющие уклонения отвесной линии

$$\xi = x + (\varphi_0 - B) = -0,66'' + 7,72'' = +7,1''; \quad m_{\xi} = 0,9'';$$

$$\eta = y + 15(\lambda_0 - L) \cos B = +1,22'' - 8,44'' = -7,2''; \quad m_{\eta} = 0,8''.$$

4. Широта пункта

$$\varphi = \varphi_0 + x = 44^\circ 58' 40,00'' - 0,66'' = 44^\circ 58' 39,3''; \quad m_{\varphi} = 0,9''.$$

5. Долгота пункта

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi = 3^h 16^m 34,500^s + \frac{1,22''}{10,611} = 3^h 16^m 34,615^s;$$

$$m'_{\lambda} = \frac{1}{15} m_y \sec \varphi = \frac{0,78''}{10,611} = 0,074^s.$$

д) Составление и решение нормальных уравнений, вывод уравненных значений определяемых величин и оценка точности производится по методу наименьших квадратов в соответствии с формулами общей теории (9.39)—(9.62). Пример составления и решения нормальных уравнений, вывод уравненных значений a_r , φ , λ (ξ , η) и оценки точности приведены в табл. 67 и 68.

**§ 69. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА,
ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ СВЕТИЛ
ВБЛИЗИ ПЛОСКОСТЕЙ
ДВУХ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ ВЕРТИКАЛОВ**

На основе выгоднейших условий наблюдений, выведенных в главе 9, совместные определения азимута, широты и долготы могут производиться не только при равномерном распределении светил по азимуту, но и при наблюдениях их вблизи плоскостей двух любых взаимно перпендикулярных вертикалов, симметрично относительно зенита, на среднем зенитном расстоянии, близком к 35° ($20^\circ < z < 50^\circ$). Только указанным выбором светил по азимутам и отличается данный способ от предыдущего. Порядок наблюдений и вычислений здесь остается точно таким же, как и в предыдущем способе.

В рассматриваемом способе наблюдения могут выполняться как сериями из $\frac{n}{2}$ звезд вблизи плоскости каждого вертикала, расположенных симметрично относительно зенита, так и из наблюдений звезд попарно. В последнем случае для совместного определения азимута, широты и долготы (ξ и η) достаточно произвести наблюдения двух пар (четверки) звезд вблизи плоскостей двух взаимно перпендикулярных вертикалов. Наблюдения каждой четверки звезд могут выполняться независимо от других четверок, в своих взаимно перпендикулярных вертикалах.

В данном способе, как и в предыдущем, программу наблюдений можно составить из одних ярких звезд и при необходимости производить наблюдения днем. При этом каждую яркую звезду можно наблюдать несколькими приемами подряд вблизи одного из вертикалов. Подбор звезд и составление эфемерид можно осуществить с помощью звездной карты и номограммы к ней (прил. 3 и 4). В отношении удобства вычислений точных эфемерид звезд наиболее целесообразными вертикалами являются меридиан и первый вертикал. Для наблюдений вблизи указанных вертикалов пользуются дифференциальными поправками Δz и ΔA .

Пример определения геодезического азимута и составляющих уклонения отвесной линии из многократных дневных наблюдений ярких звезд в вертикалах, близких к меридиану и первому вертикалу, дан в табл. 69.

С этими данными вычислены уравненные значения условного и геодезического азимута направления Комсомольский — Нагор-

Пример совместного определения геодезического азимута и составляющих уклонения отвесной линии
из многократных дневных наблюдений ярких звезд вблизи меридиана и первого вертикала

Наблюдатель: В. В. Байков

$\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$

Условные координаты пункта Комсомольский: $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$ $a_0 = 333^\circ 16' 50,00''$

Оптический теодолит ДКМ-3А № 87990, цифropечатающий хронограф

У р а в н е н и я п о п р а в о к

Дата	Номер приема	Номер звезды	m	A	z	P	a	b	c	l	s	v
15.8.1976 г.	1	278	1,9	1,5°	16,9°	0,09	+1	-0,091	+3,276	-0,22"	+3,965	-1,51"
15.8.1976 г.	2	278	1,9	2,5	17,0	0,09	+1	-0,122	+4,274	+4,39	+8,542	+3,18
15.8.1976 г.	3	278	1,9	3,7	17,0	0,09	+1	-0,211	+3,262	+1,58	+5,631	+0,60
15.8.1976 г.	4	345	0,2	88,5	63,8	0,80	+1	-0,497	+0,497	+1,73	+2,246	-1,69
15.8.1976 г.	5	345	0,2	90,9	61,3	0,77	+1	-0,551	-0,009	+6,39	+6,830	+3,10
15.8.1976 г.	6	345	0,2	91,7	60,3	0,76	+1	-0,568	-0,017	+1,50	+1,916	-1,75
15.8.1976 г.	7	142	0,6	181,0	53,2	0,64	+1	+3,013	-0,748	+8,52	+8,785	+2,95
15.8.1976 г.	8	190	1,6	182,3	62,0	0,78	+1	+0,021	-0,539	+4,94	+5,422	-0,44
15.8.1976 г.	9	213	0,5	182,4	37,6	0,41	+1	+0,050	-1,204	+4,14	+3,986	-1,98
15.8.1976 г.	10	149	1,8	268,8	45,6	0,51	+1	+0,983	-0,034	+7,96	+9,909	+0,45
15.8.1976 г.	11	149	1,8	269,9	47,0	0,54	+1	+0,924	-0,002	+5,86	+7,782	-1,46
15.8.1976 г.	12	149	1,8	271,5	48,7	0,57	+1	+0,871	-0,023	+7,05	+8,898	-0,14

Нормальные уравнения

	a]	b]	c]	l]	s]
[Pa	+6,050	+0,250	-0,551	+30,208	+35,957
[Pb		+2,070	-0,188	+6,528	+8,660
[Pc			+4,069	-6,789	-3,459
[Pl				+189,217	+219,164
Контроль	-27,641	-5,311	+3,004	+29,947	-29,948

Из решения нормальных уравнений получены следующие значения неизвестных, весов и средних квадратических погрешностей:

$$\Delta a' = -4,81'', \quad x = -2,49'', \quad y = +0,90'';$$

$$P_{a'} = 5,950, \quad P_x = 2,052, \quad P_y = 4,000;$$

$$m_{a'} = 0,63'', \quad m_x = 1,1'', \quad m_y = 0,78''$$

$$[Pv^2] = 21,59'$$

$$\mu = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-3}} = 1,55''.$$

ное, широта и долгота пункта Комсомольский, составляющие ξ и η , и произведена оценка точности.

1. Условный азимут $a' = a_0 + \Delta a' = 333^\circ 16' 45,19''$; $m_{a'} = 0,63''$.

2. Геодезический азимут $a_r = a' - 15 (\lambda_0 - L) \sin \varphi + \frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} z} a_r = 333^\circ 16' 53,59''$; $m_{a_r} = 0,63''$.

3. Широта $\varphi = \varphi_0 + x = 44^\circ 58' 37,5''$; $m_\varphi = 1,1''$.

4. Долгота $\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi = 3^h 15^m 34,58^s$; $m_{\lambda'} = 0,07^s$.

5. Составляющая $\xi = x + (\varphi_0 - B) = +5,2''$; $m_\xi = 1,1''$.

6. Составляющая $\eta = y + 15 (\lambda_0 - L) \cos \varphi = -7,5''$; $m_\eta = 0,8''$.

§ 70. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА, ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ (a_r , ξ и η) ИЗ МНОГОКРАТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ СВЕТИЛА

Принципиально решение задачи совместного определения a' , x и y из многократных наблюдений одного и того же светила ничем не отличается от решения этой же задачи по наблюдениям n светил в различных вертикалах.

Для совместного определения a' , x и y , очевидно, необходимо выбрать такое светило, для которого большая часть суточной параллели (или вся суточная параллель) находится над горизонтом.

При этом многократные последовательные наблюдения такого светила, выполненные в течение суток, будут отвечать условиям равномерного расположения светил по азимутам. Практически подобная методика может быть применена для приближенных определений a' , x и y по наблюдениям Солнца или планет в высоких широтах в период Полярного дня, когда наблюдения других светил с помощью малых экспедиционных приборов затруднительны.

Общий порядок и методика наблюдений здесь остаются такими же, как и при наблюдениях звезд, т. е. измеряются горизонтальные углы между местным предметом и Солнцем. Визирование на Солнце сопровождается отсчетами хронометра T_i .

Периодически, через 2—4 ч, производятся приемы радиосигналов времени, из которых с принятой условной долготой пункта определяется поправка хронометра и его часовой ход.

Для каждого из n приемов наблюдений Солнца составляется уравнение поправок вида (9.39). Из совместного решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов находят вероятнейшие значения a' , x и y и оценивают точность их вывода.

Далее на основании (9.50) вычисляют геодезический азимут a_r , а по формулам (9.51) астрономо-геодезические составляющие уклонения отвесной линии. В случае необходимости по формулам (9.41) вычисляют астрономические координаты пункта.

§ 71. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА НАПРАВЛЕНИЯ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЯРКИХ ЗВЕЗД В РАЗНЫХ ВЕРТИКАЛАХ

Для определения азимута направления с максимальным весом наблюдения светил, в соответствии с формулами (9.64), (9.69) и (9.70), необходимо производить на больших зенитных расстояниях ($50^\circ < z < 80^\circ$), при равномерном их распределении по азимутам.

Этот способ определения азимута отличается от способа совместного определения азимута, широты и долготы (a_r , ξ и η) из наблюдений звезд в разных вертикалах и на разных зенитных расстояниях, изложенного в § 68, только увеличением зенитных расстояний наблюдаемых светил.

По существу, данный способ определения азимута является также способом совместного определения a_r , ξ и η , но при наблюдениях светил на больших зенитных расстояниях уравненные значения ξ и η получаются с малым весом, т. е. с малой точностью, а a_r — с большой точностью.

Теория способа определения азимута из наблюдений звезд в разных вертикалах, порядок наблюдений и вычислений здесь остаются точно такими же, как и в способе совместного определения a_r , ξ и η .

§ 72. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА ИЗ МНОГОКРАТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЯРКИХ ЗВЕЗД В ВЕРТИКАЛАХ, БЛИЗКИХ К МЕРИДИАНУ

Для определения азимута направления с максимальным весом [см. формулы (9.64), (9.69) и (9.70)], наблюдения светил можно производить не только при равномерном их расположении по азимутам, но также и в плоскости любого произвольного вертикала на больших зенитных расстояниях ($50^\circ < z < 80^\circ$) симметрично относительно зенита.

С точки зрения простоты наблюдений с контактным микрометром и удобства составления эфемерид, наиболее целесообразным из таких вертикалов является меридиан.

Так как видимое движение светил в меридиане и вблизи него происходит параллельно плоскости горизонта, то при наблюдениях с контактным микрометром отпадает надобность в позиционном устройстве или в механизме вращения трубы теодолита по высоте.

При наблюдениях светил в плоскости самого меридиана наблюдатель ограничен в выборе ярких звезд на больших зенитных

расстояниях, особенно в северной части меридиана. В результате много времени уходит на ожидание звезд. При наблюдениях же светил в вертикалах, близких к меридиану, создается возможность наблюдать одну и ту же звезду несколько раз подряд в течение значительного промежутка времени. Таким образом оказывается возможным построить программу наблюдений для определения азимута из одних ярких звезд и без перерывов в работе на их ожидание.

Указанное обстоятельство имеет важное значение при работе в высоких широтах в период белых ночей и незаходящего Солнца, а также в средних широтах, при необходимости определения азимута в светлое время суток.

Способ разработан в ЦНИИГАиК В. Г. Львовым и с 1970 г. рекомендован для непосредственного определения геодезического азимута в высоких широтах.

Итак, для определения азимута данным способом наблюдают звезды в вертикалах, близких к меридиану (до $8-10^\circ$ от меридиана), на больших зенитных расстояниях ($50^\circ < z < 80^\circ$), примерно равным числом приемов по обе стороны от зенита.

При вычислениях азимутов светил вблизи меридиана (при малых значениях A'_{0_i}) с помощью обычных вычислительных средств целесообразно пользоваться формулой

$$\operatorname{tg} A'_{0_i} = \frac{m_i \sin t_{0_i}}{n_i \cos t_{0_i} - 1}, \quad (10.4)$$

полученной путем деления выражения $\sin z_i \sin A'_{0_i} = \sin t_{0_i} \cos \delta_i$ на $\sin z_i \cos A_{0_i} = \cos \varphi_0 \sin \delta_i - \sin \varphi_0 \cos \delta_i \cos t_{0_i}$.

В формуле (10.4)

$$m_i = \operatorname{ctg} \delta_i \sec \varphi_0;$$

$$n_i = \operatorname{ctg} \delta_i \operatorname{tg} \varphi_0;$$

$$t_{0_i} = T_{H_i} + u_0 + \omega (T_{H_i} - X) - \alpha_i.$$

Для каждого приема измерения горизонтального угла Q'_i составляется уравнение поправок вида (9.39) или (9.45), причем часовой угол и азимут светила вычисляются со средним моментом наблюдений в приеме. Из совместного решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов находят вероятнейшее значение азимута и оценивают точность его вывода. При окончательных вычислениях уравненный азимут исправляют поправкой за лично-инструментальную разность и всеми другими редукциями.

Вместе с азимутом будут получены и составляющие уклонения отвесной линии. Однако веса их уравненных значений при данных условиях наблюдений будут малы, особенно мал будет вес P_x .

Пример определения геодезического азимута

из многократных наблюдений ярких звезд в вертикалах, близких к меридиану

Дата: 17/18.8.1976 г.

Наблюдатель: В. В. Байков

Условные координаты п. Комсомольский:

$$\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,00''$$

$$\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50''$$

Предварительный азимут направления

п. Комсомольский — п. Нагорное

$$a_0 = 333^\circ 16' 50,00''$$

Приборы: оптический теодолит ДКМ-ЗА № 87990, цифрорпечатающий хронограф 21 П

У р а в н е н и я п о п р а в о к

Дата	Номер приема	Номер звезды	A	z	P	a	b	c	l	s
17/18 августа	1	424	170,3°	32,8°	0,292	+1	-0,261	-1,535	+4,76"	+3,964
1976 г.	2	424	174,6	32,5	0,289	+1	-0,146	-1,563	+5,84	+5,131
То же	3	424	178,0	32,4	0,287	+1	-0,054	-1,574	+5,71	+5,032
»	4	424	181,3	32,4	0,288	+1	+0,037	-1,575	+6,18	+5,642
»	5	424	185,0	32,5	0,288	+1	+0,138	-1,565	+3,92	+3,493
»	6	460	7,4	26,8	0,203	+1	-0,257	+1,966	-0,48	+2,229
»	7	460	6,0	26,6	0,200	+1	-0,209	+1,897	+1,69	+4,459
»	8	460	4,5	26,4	0,198	+1	-0,157	+2,004	-0,12	+2,727
»	9	460	1,4	26,3	0,196	+1	-0,049	+2,023	+0,15	+2,989
»	10	460	356,9	26,4	0,197	+1	+0,108	+2,015	-1,65	+1,173
					[P] = 2,437					

Таблица 71

1. Н о р м а л ь н ы е у р а в н е н и я

	l	b]	c]	l]	s]
[P	+2,437	-0,197	-0,267	+7,540	+9,513
[Pb		+0,062	-0,086	-0,554	-0,775
[Pc			+7,494	-12,075	-4,934
[Pl				+42,378	+37,286
Контроль	-5,398	-0,530	+11,026	-5,089	+5,098

2. Р е ш е н и е н о р м а л ь н ы х у р а в н е н и й

$$\Delta_{11} = +0,4572 \quad \Delta_{x31} = +2,2309 \quad \Delta = +0,8084$$

$$\Delta_{12} = -1,4993 \quad \Delta_{x32} = -27,4136 \quad \Delta_{a'} = -2,2122$$

$$\Delta_{13} = +0,0335 \quad \Delta_{x33} = +0,1353 \quad \Delta_x = +1,9393$$

$$\Delta_y = +1,2485$$

$$\Delta_{a'} = \frac{\Delta_{a'}}{\Delta} = \frac{-2,2122}{0,8084} = -2,736''; \quad x = \frac{\Delta_x}{\Delta} = +2,399'';$$

$$y = \frac{\Delta_y}{\Delta} = +1,544''.$$

3. Оценка точности

$$[Pv^2] = [Pl] + [Pal] \Delta' + [Pbl] x + [Pcl] y = \\ = 42,38 - 20,63 - 1,33 - 18,64 = 1,78.$$

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{n-k}} = \sqrt{\frac{1,78}{7}} = 0,55''$$

$$P_{a'} = \frac{\Delta}{\Delta_{11}} = \frac{0,808}{0,457} = 1,77, \quad P_x = \frac{\Delta}{\Delta_{22}} = \frac{0,808}{18,259} = 0,044$$

$$P_y = \frac{\Delta}{\Delta_{33}} = \frac{0,808}{0,112} = 7,20$$

$$m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{P_{a'}}} = 0,41'' \quad m_x = \frac{\mu}{\sqrt{P_x}} = 2,6''$$

$$m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}} = 0,21''$$

4. Уравненные значения искоемых величин

а) Условный азимут $a' = a_0 + \Delta a' = 333^\circ 16' 47,26''$; $m_{a'} = 0,41''$.

б) Геодезический азимут

$$a'_r = a' - 15(\lambda_0 - L) \sin B - \frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} z_{\Delta}},$$

$$\lambda_0 - L = -0,795''; \quad 15(\lambda_0 - L) \sin B = -8,43''$$

$$\eta_0 = 15(\lambda_0 - L) \cos B = -8,44''; \quad \xi_0 = \varphi_0 - B = +7,72''$$

$$\frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} z_{\Delta}} = -0,03'',$$

$$a'_r = 333^\circ 16' 47,26'' + 8,43'' - 0,03'' = 333^\circ 16' 55,66''; \quad m_{a_r} = 0,41''.$$

в) Составляющая уклонения отвеса

$$\eta' = y + 15(\lambda_0 - L) \cos B = +1,54'' - 8,44'' = -6,90''; \quad m_{\eta} = 0,21''.$$

г) Долгота пункта

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{y}{15 \cos \varphi_0} = 3^{\text{h}}15^{\text{m}}34,500^{\text{s}} + \frac{1,54''}{10,611} = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,645^{\text{s}}$$

$$m_{\lambda'} = \frac{1}{15 \cos \varphi_0} m_y = 0,020''.$$

Таблица 72

1. Нормальные уравнения

	l	c]	l]
[P	+2,437	-0,267	+7,540
[Pc		+7,494	-12,075
[Pl			+42,378
Контроль	-6,356	+10,891	-4,535 +4,535

2. Решение нормальных уравнений

$$\Delta = 18,1916$$

$$\Delta_{a'} = -53,2807, \quad \Delta a' = \frac{\Delta_{a'}}{\Delta} = -2,929'', \quad y = \frac{\Delta_y}{\Delta} = +1,507''$$

$$\Delta_y = +27,4136$$

3. Оценка точности

$$[Pv^2] = [Pl] + [Pl] \Delta a' + [Pcl] y = 42,378 - 22,085 - 18,197 = 2,096$$

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{n-2}} = \sqrt{\frac{2,096}{8}} = 0,51''$$

$$P_{a'} = \frac{\Delta}{[Pcc]} = \frac{18,1916}{7,494} = 2,43, \quad P_y = \frac{\Delta}{[P]} = \frac{18,1916}{2,437} = 7,50$$

$$m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{P_{a'}}} = 0,32'', \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}} = 0,19''$$

4. Уравненные значения искоемых величин

а) Условный азимут $a' = a_0 + \Delta a' = 333^\circ 16' 47,07''$; $m_{a'} = 0,32''$

б) Геодезический азимут $a'_r = a' - 15(\lambda_0 - L) \sin B - \frac{\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a'}{\operatorname{tg} z_\Delta}$
 $= 333^\circ 16' 55,47''$; $m_{a'_r} = 0,32''$

в) Составляющая уклонения отвеса

$$\eta' = y + 15(\lambda_0 - L) \cos B = +1,51'' - 8,44'' = -6,93''; \quad m_\eta = 0,19''$$

д) Долгота пункта $\lambda = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi_0 = 3^h 16^m 34,643^s$

$$m_\lambda = 0,018^s.$$

Необходимо иметь в виду, что при наблюдениях светил в плоскости одного вертикала или вблизи него система нормальных уравнений с тремя неизвестными (a' , x и y) является плохо обусловленной. Определитель такой системы может быть очень мал.

Поэтому при наблюдениях светил вблизи меридиана целесообразно переходить к решению задачи уравнивания с двумя неизвестными, полагая $x = 0$.

Погрешность $\Delta\varphi$ принятого при вычислениях значения широты φ_0 при наблюдениях вблизи меридиана незначительно влияет на точность определения азимута.

Если многократные наблюдения каждого светила располагаются примерно симметрично относительно плоскости меридиана, то погрешность в широте, равная $0,1-0,2'$, практически не окажет влияния на точность вычисления азимута. Пример определения геодезического азимута из многократных дневных наблюдений северной и южной звезд дан в табл. 70, 71 и 72.

Данный пример заимствован из совместных определений азимута и составляющей η . Поэтому зенитные расстояния звезд здесь близки к 30° , а значение веса P_a' сравнительно невелико. В табл. 71 приведено решение с тремя неизвестными, в табл. 72 — с двумя неизвестными.

§ 73. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА ИЗ МНОГОКРАТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЯРКИХ ЗВЕЗД ВБЛИЗИ ПЕРВОГО ВЕРТИКАЛА

Точность определения условного или геодезического азимута не зависит от выбора вертикала, в плоскости которого производят наблюдения звезд. Позиционное устройство контактного микрометра теодолита ДКМ-3А позволяет исключить остаточное влияние наклона подвижной вертикальной нити при наблюдениях звезд в любом вертикале.

Издание «Эфемерид для наблюдений звезд в первом вертикале» обеспечило возможность практического применения способа определения азимута из многократных наблюдений ярких звезд вблизи первого вертикала. Достоинства данного способа точно такие же, как и при многократных наблюдениях ярких звезд вблизи меридиана. Для определения условного (геодезического) азимута в этом способе измеряют горизонтальные углы Q'_i между светилами вблизи первого вертикала и местным предметом. Многократные наблюдения каждого светила целесообразно располагать симметрично относительно плоскости первого вертикала.

Для определения азимута с максимальным весом наблюдается равное число приемов для западных и восточных звезд, выбираемых на больших и примерно равных средних зенитных расстояниях.

Для каждого измеренного горизонтального угла Q'_i составляется уравнение поправок вида (9.39) или (9.45). При выполнении указанных условий наблюдений уравнивание производят с двумя неизвестными, пренебрегая малым влиянием составляющей y (η).

При определениях азимутов в высоких широтах целесообразна комбинация многократных наблюдений ярких звезд вблизи меридиана и вблизи первого вертикала. Сочетание этих способов существенно увеличивает число ярких звезд в один и тот же промежуток времени и тем самым повышает гибкость способа непосредственного определения геодезического азимута.

§ 74. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОГО АЗИМУТА ПО ИЗМЕРЕННОМУ ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ УГЛУ МЕЖДУ ПОЛЯРНОЙ И МЕСТНЫМ ПРЕДМЕТОМ

1. Теория способа

С позиций общей теории данный способ можно рассматривать как обычный способ определения азимута из многократных наблюдений одного и того же светила. Для каждого приема измерения

горизонтального угла Q'_i между Полярной и местным предметом можно составить уравнение поправок вида (9.39) или (9.45)

$$\Delta a' + b_i x + c_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i. \\ (i = 1, 2, \dots, n)$$

Однако в отличие от других светил изменения в видимом положении Полярной для данного пункта настолько незначительны, что коэффициенты b_i и c_i остаются практически одними и теми же во всех уравнениях. Такая система уравнений, как известно, неразрешима.

Отсюда следует, что из многократных измерений горизонтальных углов между Полярной и местным предметом нельзя получить непосредственным методом ни условного, ни геодезического азимута направления на местный предмет.

Остается единственно возможный путь обработки таких измерений — путь вычислений астрономического азимута с известными астрономическими координатами пункта φ и λ (точнее, φ и u). В этом случае в уравнениях (9.39) можно принять

$$y = 0, \quad x = 0, \quad \Delta a' = \Delta a.$$

Склонение Полярной для эпохи 1980.0 составляет $89,1^\circ$, а азимут для широт $\varphi < 70^\circ$ не превышает $2,5^\circ$. Поэтому коэффициенты $b_i = \left(\frac{\partial A}{\partial \varphi}\right)_i = -\sin A_i \operatorname{ctg} z_i$ и $c_i = \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)_i = \frac{\sin \delta_i \cos q_i}{\sin z_i}$ для Полярной столь малы, что небольшие погрешности $\Delta \varphi$ и Δu не будут оказывать влияния на точность определения астрономического азимута.

Уравнения поправок (9.39) примут при этом вид

$$\Delta a + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i, \\ (i = 1, 2, \dots, n),$$

где

$$l_i = (a_0 - A_{N_i}) - Q'_i; \\ A_{N_i} = A'_{N_i} + \delta A_i + \Delta A_{W_i}; \\ A'_{N_i} = \operatorname{arctg} \frac{m \sin t_i}{n \cos t_i - 1}.$$

Нормальное уравнение, соответствующее n уравнениям (10.5), имеет вид

$$[P] \Delta a + [Pl] = 0,$$

откуда

$$\Delta a = -\frac{[Pl]}{[P]} \text{ с весом } P_a = [P].$$

Уравненное значение астрономического азимута будет

$$a = a_0 + \Delta a \text{ с весом } P_a = [P] \approx n \sin^2 z_{cp} \approx n \cos^2 \varphi.$$

Оценка точности производится по формулам:

средняя квадратическая погрешность единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-1}}, \quad (10.7)$$

где

$$[Pv^2] = [Pll] + [Pl] \Delta a;$$

средняя квадратическая погрешность уравненного азимута

$$M_a = \frac{\mu}{\sqrt{[P]}} = \frac{\mu}{\sqrt{n}} \sec \varphi. \quad (10.8)$$

Идея способа определения астрономического азимута по измеренному горизонтальному углу между Полярной и местным предметом была известна давно. Однако применение этого способа для определения точных азимутов стало возможным только после создания точных угломерных приборов.

В нашей стране и в некоторых других странах северного полушария способ определения астрономического азимута по Полярной звезде принят как основной способ определения точных азимутов в астрономо-геодезической сети.

Данный способ обладает целым рядом существенных преимуществ перед другими способами.

Яркая Полярная звезда ($m = 2,1$) является незаходящей звездой практически для всего северного полушария. Ее можно наблюдать как ночью, так и днем относительно малыми переносными приборами. Способ достаточно прост в наблюдениях и вычислениях.

Одно из главных преимуществ этого способа, как указывалось выше, состоит в том, что погрешности определения времени и широты не оказывают существенного влияния на точность определения астрономического азимута Полярной звезды, а следовательно, и азимута направления на местный предмет. Это главное преимущество и послужило теоретической основой для разработки данного способа.

Наряду с указанными достоинствами, способ определения астрономического азимута по часовому углу Полярной звезды обладает также и существенными недостатками, которые имеют весьма важное значение при таких точных построениях, как астрономо-геодезическая сеть.

Рассматривая данный способ с позиций общей теории, можно сделать следующие выводы. Средняя квадратическая погрешность определения азимута по Полярной при одной и той же программе и средствах измерений возрастает с увеличением широты пункта пропорционально $\sec \varphi$. Так как зенитное расстояние Полярной для данного пункта меняется в незначительных пределах, то инструментальные погрешности, влияющие на результат измерений в функции зенитного расстояния, будут иметь систематический характер. К таким погрешностям можно отнести погрешности

цапф, боковое гнутие трубы, некоторые погрешности в определении наклонности горизонтальной оси и др.

Влияние указанных систематических погрешностей может быть весьма значительным. Так, например, погрешность цапф в 1 мкм при длине горизонтальной оси 20 см может дать систематическую погрешность в азимуте, превышающую 1".

При наблюдениях астрономического азимута по Полярной геодезический азимут направления определяют косвенным методом с использованием уравнения Лапласа (9.48). При этом, кроме погрешностей определения астрономического азимута, весьма существенное влияние на точность определения геодезического азимута будут оказывать погрешности определения астрономической долготы пункта.

Таким образом, наряду с некоторыми достоинствами данный способ обладает существенными недостатками. При современном уровне техники и организации астрономических определений косвенный метод определения геодезического азимута по Полярной звезде уступает по точности методу непосредственного определения из наблюдений звезд на больших зенитных расстояниях.

2. Наблюдения

Для определения азимута направления на пунктах 1 и 2 классов применяют астрономические теодолиты АУ 2"/10", Вильд Т4 и им подобные, позволяющие измерять горизонтальный угол одним приемом с погрешностью, не превышающей 1,5".

Прибор исследуется в соответствии с требованиями Инструкции, изложенными в главе 3.

Определения астрономического азимута направления по часовому углу Полярной производят как днем, так и ночью при наличии благоприятных условий для наблюдений земного предмета. Дневные наблюдения рекомендуется прекращать за полчаса до захода Солнца, а ночные начинать спустя полчаса после его захода. Азимут определяют 18 приемами с перестановкой горизонтального круга между приемами через $10^{\circ} 05'$. Для ослабления погрешностей, связанных с влиянием внешних условий, программа определения азимута должна выполняться в течение не менее чем трех суток.

Для определения поправки хронометра и его хода принимают радиосигналы времени через такие интервалы, которые обеспечивают вывод u с погрешностью, не превышающей $0,1^s$. Наблюдения азимута должны быть заключены между приемами сигналов времени.

При определении азимута наблюдают обязательно гелиотроп или фонарь, установленные на сигнале. Как правило, азимут наблюдают со столика геодезического сигнала. Если рельеф местности обеспечивает необходимую высоту визирного луча, то азимут наблюдают с астрономического столба, который устанавливают примерно в створе наблюдаемого направления.

При определении азимута со столба каждый прием содержит: наблюдение земного предмета — четыре наведения* на предмет подвижной нитью окулярного микрометра с отсчетами по головке микрометра; отсчет горизонтального лимба (перед первым наведением алидаду поворачивают против хода часовой стрелки на $30-40^\circ$);

поворот алидады по ходу часовой стрелки на величину измеряемого угла; наблюдение Полярной — отсчет накладного уровня, три наведения подвижной нитью окулярного микрометра на Полярную под счет секундных ударов хронометра с соответствующей записью отсчетов хронометра и микрометра, отсчет уровня и отсчеты горизонтального лимба. При визировании на земной предмет и Полярную следует пользоваться не биссектором, а одиночной подвижной нитью окулярного микрометра, что ослабляет влияние личных ошибок наблюдателя;

перекладку уровня на 180° ;

второе наблюдение Полярной в таком же порядке, как и первое (перед наблюдением алидаду поворачивают против хода часовой стрелки на $30-40^\circ$);

поворот алидады по ходу часовой стрелки на величину дополнения измеряемого угла до 360° ; второе наблюдение земного предмета в таком же порядке, как первое.

Указанные действия составляют полуприем; во втором полуприеме трубу переводят через зенит и все перечисленные действия повторяют, изменив направление движения алидады на обратное.

При определении азимута со столика сигнала используется поверительная труба. В этом случае при наблюдении земного предмета и Полярной в момент каждого наведения окулярного микрометра главной трубы делают наведение на марку подвижной нитью окулярного микрометра поверительной трубы и производят отсчеты по головке микрометра. Если при наблюдении земного предмета угол наклона визирного луча к горизонту превышает 1° , то отсчитывают накладной уровень по одному разу при первом и втором его наблюдениях в полуприеме.

Для вычисления поправки в отсчеты горизонтального лимба за окулярный микрометр поверительной трубы определяют зенитное расстояние марки, на которую наводят нить окулярного микрометра поверительной трубы.

Полевой контроль каждого приема производится немедленно по его окончании и заключается в сравнении измеренных в полуприемах направлений на земной предмет. Разность горизонтальных направлений на местный предмет в полуприемах после исправления их поправками за окулярные микрометры главной и поверительной трубы не должна превышать $4''$. Колебание двойной коллимационной ошибки по наблюдениям земного предмета не должно выходить за пределы $6''$, а колебание нуля-пункта, уровня — за пределы трех полуделений. Расхождения отдельных значений азимута направления должны находиться в пределах $6''$.

Приемы, не удовлетворяющие указанным требованиям, повторяются на тех же установках лимба.

Пример определения азимута направления по часовому углу Полярной и журнал наблюдений приведены в табл. 73.

Программа измерения горизонтального угла между Полярной и местным предметом в каждом полуприеме составлена так, что наблюдения звезды ведутся симметрично относительно среднего момента, это позволяет ослабить влияние погрешностей, действующих на результаты наблюдений пропорционально времени. Однако следует заметить, что эта программа довольно громоздка. В каждом приеме производится 16 визирований подвижной нитью микрометра на местный предмет, 12 визирований на Полярную, 28 визирований на марку с помощью поверительной трубы, четырежды производится независимое определение наклона горизонтальной оси (не считая определения наклона при наблюдении местного предмета, если его зенитное расстояние отличается от 90° более, чем на 1°).

Наблюдение каждого приема занимает сравнительно большой промежуток времени (20—25 мин), что является нежелательным, особенно при измерениях, выполняемых со столика тригонометрического знака.

Специальные исследования показывают, что при сокращении программы измерений в приеме вдвое точность определения азимута практически не снижается. Это обстоятельство указывает на наличие в измерениях остаточного влияния систематических погрешностей, не исключаемых приведенной выше методикой наблюдений. Рассмотрим порядок наблюдений в приеме по сокращенной программе.

а) Наблюдение местного предмета при КЛ (КП):

три последовательных визирования на местный предмет подвижной нитью окулярного микрометра; отсчеты по головке микрометра, отсчет горизонтального лимба.

б) Наблюдения Полярной при КЛ (КП):

отсчет уровня и перекладка его на 180° ; три визирования на Полярную подвижной нитью микрометра под счет секундных ударов хронометра — запись отсчетов по головке микрометра и отсчетов показаний хронометра; отсчеты уровня и горизонтального лимба.

в) Наблюдение Полярной при КП (КЛ) так же, как в пункте б;

г) Наблюдение местного предмета при КП (КЛ) так же, как в пункте а.

При наблюдениях со столика сигнала одновременно с визированием на местный предмет и Полярную производятся визирования на миру окулярным микрометром поверительной трубы.

При наблюдениях прецизионными оптическими приборами (типа ДКМ-3А, Вильд Т-4, «Аскания» и т. д.), с которыми наблюдения Полярной при двух кругах осуществляются наблюдателем «не сходя с места», перекладку уровня на оси производить нецелесообразно.

Теодолит АУ 2"/10" № 3205

Хронометр № 345

Цена деления микрометра главной трубы $\mu_{гг} = 1,146''$ » » » поверительной трубы $\mu_{пт} = 1,430''$ Цена деления накладного уровня $\tau = 2,25''$ $m = 35$ Тип микроскопов микрометра $r_A = -0,38''$, $r_B = +0,22''$ $\varphi = 50^\circ 11' 12''$ $\lambda = 3^{\text{h}}01^{\text{m}}$ $H = 426 \text{ м}$

Видимость — удовлетворительная

Состояние погоды: ясно, тихо

 $t^\circ \text{С} = +24^\circ$

Ж у р н а л н а б л ю д е н и й

П р и е м V I I I

Дата 12/13 августа 1973 г.

КЛ

 $s = 16^{\text{h}}05^{\text{m}}$ $z_L = 40^\circ 36,7'$; $\text{ctg } z_L = 1,166$; $\text{cosec } z_L = 1,536$; $\frac{\tau}{2} \text{ctg } z_L = 1,312''$; $\mu \text{cosec } z_L = 1,760''$

Объект наблюдений	Отсчеты по микрометрам		T	Уровень (Л + П) _о (Л + П) _х	Отсчеты по микроскопам				Поправки за главную трубу, поверительную трубу, уровень, гип., сумма	Направления
	главная труба	поверительная труба			лимба	a ₁ a ₂	b ₁ b ₂	$\frac{a+b}{2}$		
Земной предмет, фонарь	99,5 ^д	0,1 ^д			121° 01'	4,3 ^д	10,4 ^д	9,7''	+0,23''	121° 01' 18,05''
	1,0	1,5				21,8	20,7	22,5	+1,72	
	0,6	2,0								
	99,5	1,1								
αUmi	0,2	1,2	00 ^s 08	10,7—20,7	25 05			16,10	+1,95	25 05 17,06
	99,1	2,0				4,2	10,2	9,4	+1,46	
	1,0	1,1				4,6	3,2	7,8	+2,67	
	2,4	2,5							+4,33	
		16 ^h 04 ^m 16		24,0—14,0						

αUmi	0,83	1,87	16 ^h 04 ^m 08,0 ^s	38,0 31,4 $b = +3,30$ $x = +0,30$ 24,0—14,0	25 05	22,8 23,7	23,8 21,2	8,60 26,6 24,9	+8,46 +5,51 +3,58 +5,84	25 05 40,68
	1,5 2,9 5,0	2,6 2,0 2,9	08 15 16 05 24	9,5—19,6						
	3,13	2,50	16 ^h 05 ^m 15,7 ^s	38,0 29,1 $b = +4,45$ $x = +1,45$				25,75	+14,93	25 05 28,87
Земной предмет, фонарь	2,5	2,0	$T_L = 16^h04^m41,8^s$ $T_{cp} = 16\ 08\ 39,5$		121 01	2,1 14,0	3,0 12,4	5,1 16,4	+3,44 +3,72	
	2,0	2,7								
	3,3	2,5	$\Delta T = 3^m57,7^s =$ $= 237,7^s$							
	4,0	3,0								
	3,0	2,6								

$$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 =$$

$$= 30,82''$$

$$s = 16^h09^m$$

$$\lambda + \alpha = 4^h53^m$$

$$s - (\lambda + \alpha) = 11^h16^m$$

$$n = +0,469$$

КП

$$s = 16^h13^m$$

$$z_R = 40^\circ 35,6' \quad \text{ctg } z_R = 1,167; \quad \text{cosec } z_R = 1,537; \quad \frac{\tau}{2} \text{ctg } z_R = 1,313; \quad \mu \text{cosec } z_R = 1,761$$

Земной предмет, фонарь	1,8 ^d	3,0 ^d			301° 01'	4,1 ^d	4,6 ^d	8,7''	-2,18''	
	1,5	2,6				11,3	4,7	11,0	+4,00	
	1,8	2,8								
	2,5	2,0				9,85		9,85	+1,82	301° 01' 11,67''
	1,9	2,8								

Объект наблюдений	Отсчеты по микрометрам		T	Уровень (Л + П) ₀ , °(Л + П), b, x	Отсчеты по микроскопам				Поправки за главную трубу, поверительную трубу, уровень, гип, сумма	Направление
	главная труба	поверительная			лимба	a ₁ a ₂	b ₁ b ₂	$\frac{a+b}{2}$		
αUmi	0,5 98,9 95,8	3,0 3,5 3,9	42 ^s 51 16 ^h 12 ^m 00 ^s	19,5—9,4 15,6—25,7	205 07	22,3 41,8	22,2 34,6	24,5 41,4	+2,82 +4,96 -8,14	205 07 32,59
	98,40 2,0 0,8 99,3 0,70	3,47 4,0 3,2 3,0 3,40	16 ^h 11 ^m 51,0 ^s 15 23 16 13 32 16 ^h 13 ^m 23,3 ^s	28,9 41,3 b = -6,20 x = -0,10 15,6—25,7 19,6—9,5 29,1 41,3 b = -6,10 x = -0,20	205 07	53,6 12,8	58,8 11,0	32,95 57,4 13,8 5,60	-0,36 -1,23 +4,86 -8,01 -4,38	205 08 01,22 205 07 46,90
Земной предмет, фонарь	98,7 0,5 89,4 99,5 99,3	3,0 3,9 4,0 4,0 3,7	T _R = 16 ^h 12 ^m 37,2 ^s		301 01	1,0 2,1	2,2 4,4	3,2 6,5 4,85	+0,80 +5,29 +6,09	301° 01' 10,94"
α = 1 ^h 51 ^m 33,35 ^s		M _{cp} = 121° 01' 14,64"		M _R = 301° 01' 11,30"						
δ = 89° 02' 37", 51"		N _{cp} = 25 06 37,88		2c = + 6,97"						
u = - 0 ^m 05,16 ^s		Q' = 95° 54' 36,76"								

Журнал определения азимута по часовому углу Полярной

$\lambda = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,68^{\text{s}}$

Пункт *Ивановка* $\varphi = 44^{\circ} 58' 37,5''$
 Направление *Ивановка—Нагорное*
 Теодолит ДКМ-3А № 87900 Хронометр № 834
 Наблюдатель *Наугольный А. В.*
 Дата 14 июля 1975 г.

П р и е м 6

$$\begin{aligned}
 u &= 34,50^{\text{s}} & \alpha + \lambda &= 4^{\text{h}}15,8^{\text{m}} & z &= 45^{\circ} 41,8' & \mu &= 0,9647'' \\
 T_H &= 16^{\text{h}}41^{\text{m}}32,6^{\text{s}} & s - (\alpha + \lambda) &= 12\ 26,3 & \text{ctg } z &= 0,9760 \text{ cosec } z = 1,3973 & \frac{\tau}{2} &= 0,862'' \\
 s &= 16^{\text{h}}42^{\text{m}}07,10^{\text{s}} & n &= 0,518 & \frac{\tau}{2} \text{ ctg } z &= 0,841'' & \mu \text{ cosec } z &= 1,3477''
 \end{aligned}$$

Объект наблюдений	Время T	Уровень	Микрометр	Горизонтальный лимб	Направление
КЛ					
п. Нагорное			9,902 ⁰⁶ 9,893 9,900	170° 10' 16,1" 16,20" 16,3	170° 09' 47,10"
Полярная	16 ^h 37 ^m 39 ^s	28,0—12,8	9,898	$\Delta M_L = -29,10''$	305° 44' 19,38"
	38 51	28,8—13,3	10,610	305° 42' 41,0" 41,00" 41,0	$N' = 305^{\circ} 45' 08,23''$
	39 30	28,4—13,0	817	$\Delta N_L = +1' 38,38''$	$\Delta N_b = -0,76$
	16 ^h 38 ^m 40,10 ^s	41,4	10,730		$N = 305^{\circ} 45' 07,47''$
КП					
Полярная	16 ^h 43 ^m 35 ^s	13,5—28,9	10,246	125° 46' 18,1' 18,00" 17,9	125° 45' 56,98"
	44 27 45 14	14,3—29,7	141 082		
	16 ^h 44 ^m 25,3 ^s	13,9—29,3	10,156	$\Delta N_R = -21,02''$	350° 09' 52,60"
п. Нагорное	$T_H = 16^{\text{h}}41^{\text{m}}32,6^{\text{s}}$	43,2	10,340	350° 10' 25,4" 25,30" 25,2	$M = 170^{\circ} 09' 49,85''$
	$\Delta T = 2^{\text{m}}52,7^{\text{s}} = 172,7$	$b\partial/2 = -0,9$	338	$\Delta M_R = -32,70''$	$N = 305\ 45\ 07,47$
	$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100}\right)^2 = 16,27''$	$\Delta N_b = -0,76''$	10,339		$Q' = 224^{\circ} 24' 42,38''$
			10,339		$2c = -5,5''$

Вследствие резкого сокращения промежутка времени на наблюдение каждого приема (до 5—7^m) и сохранения симметрии относительно среднего момента в приеме, надобность в применении поверительной трубы отпадает.

Пример и журнал определения азимута оптическим теодолитом ДКМ-3А приведен в табл. 74.

3. Обработка журнала наблюдений

Обработка журнала наблюдений включает:

вычисление поправок и хода хронометра из приема радиосигналов времени;

вычисление средних моментов наблюдений для каждой группы визирований на Полярную;

вычисление горизонтальных направлений на местный предмет и на Полярную для КЛ и КП по формулам (8.23), (8.24). Для подсчета поправок горизонтальных направлений на Полярную звезду за наклон горизонтальной оси и за окулярный микрометр главной трубы предварительно вычисляется для каждого полуприема зенитное расстояние Полярной с точностью до 0,1' по формуле

$$z = 90^\circ - \varphi + I + II + III, \quad (10.9)$$

где I , II и III — выбираются из табл. 24 АТ.

Зенитное расстояние Полярной можно также вычислить, пользуясь таблицей АЕ для определения широты по наблюдениям Полярной, по формуле

$$z = 90^\circ - \varphi + I; \quad (10.10)$$

вычисление нуля-пункта уровня для каждого определения наклонности с перекладкой уровня на 180°;

вычисление двойной коллимационной ошибки из наблюдений земного предмета;

выбор видимых координат Полярной α и δ из АЕ на средний момент ее наблюдения в приеме

$$s_{cp} = T_{cp} + u + \omega(T_{cp} - X);$$

интервал интерполирования в долях суток определяется по формуле

$$n^d = [s_{cp} - (\lambda + \alpha_0)]^d, \quad (10.11)$$

где λ — долгота пункта; α_0 — приближенное значение прямого восхождения Полярной.

Пример обработки журнала наблюдений по полной программе приведен в табл. 73, а по сокращенной программе — в табл. 74.

4. Вычисление азимута направления на земной предмет

Вычисление азимута можно производить по формулам общей теории (10.5)—(10.8). При этом для вычислений на ЭВМ будут справедливы универсальные алгоритм и программа азимутальных способов. На практике при вычислениях с помощью обычных средств пользуются более простой методикой, в которой измерения горизонтальных углов Q_i полагают равновесными. Формулы для вычислений азимута из наблюдений одним приемом в этом случае имеют вид

$$a_i = A_{N_i} + Q_i \text{ или } a_i = M_i - M_{N_i}, \quad (10.12)$$

где

$$A_{N_i} = A'_{N_i} + \delta A_i + \Delta A_{w_i},$$

$$A'_{N_i} = \arctg \frac{m_i \sin t_i}{n \cos t_i - 1},$$

$$Q_i = M_i - N_i;$$

$$M_{N_i} = N_i - A_{N_i}.$$

Вычисление урванного значения азимута из n приемов и оценка точности производится по формулам арифметической середины

$$a_{cp} = \frac{\sum a_i}{n}; \quad \mu = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}; \quad m_a = \frac{\mu}{\sqrt{n}}. \quad (10.13)$$

Следует иметь в виду, что погрешность единицы веса μ в данном случае изменяет свое смысловое значение. Здесь она характеризует погрешность определения азимута одним приемом по внутренней сходимости результатов наблюдений на данном пункте с широтой φ , т. е. для данного зенитного расстояния Полярной z_N .

В формулах же общей теории она дает характеристику точности измерений одним приемом для положения светила в горизонте при $z_N = 90^\circ$, что для Полярной означает ее наблюдение на экваторе при $\varphi = 0^\circ$. Зависимость между указанными значениями погрешностей единицы веса определяется выражением

$$\mu = \mu_0 \operatorname{cosec} z_N \approx \mu_0 \sec \varphi. \quad (10.14)$$

Из формулы (10.14) следует, что погрешность определения азимута по Полярной при одной и той же программе и средствах измерений возрастает с увеличением широты пропорционально $\operatorname{cosec} z_N \approx \sec \varphi$.

Вычисление азимута направления по формулам (10.12) можно производить двумя путями:

а) вычисление азимута Полярной A_{N_i} и места Севера M_{N_i} для каждой группы визирований с последующим усреднением

Вычисление астрономического азимута по часовому углу Полярной
с раздельными моментами наблюдений (журнал см. в табл. 73)

Прием VIII 12/13 августа 1973 г.

Номер действия	Действия	КЛ	КЛ	КП	КП
1	T	$16^h04^m08,0^s$	$16^h05^m15,7^s$	$16^h11^m51,0^s$	$16^h13^m23,3^s$
2	$\alpha - u$	1 51 38,5	1 51 38,5	1 51 38,5	1 51 38,5
4	t^h	14 12 29,5	14 13 37,2	14 20 12,5	14 21 44,8
5	t°	$213^\circ 07' 22,5''$	$213^\circ 24' 18,0''$	$215^\circ 03' 07,5''$	$215^\circ 26' 12,0''$
6	$\sin t$	-0,546437	-0,550554	-0,574321	-0,579803
7	$\cos t$	-0,837500	-0,834799	-0,818630	-0,814757
15	$m \sin t$	-0,014244	-0,014352	-0,014971	-0,015114
16	$n \cos t - 1$	-1,016770	-1,016716	-1,016392	-1,016315
17	$\operatorname{tg} A'_N$	+0,014009	+0,014116	+0,014730	+0,014871
19	N_L $N_R \pm 180^\circ$	$25^\circ 05' 17,06''$	$25^\circ 05' 40,68''$	$25^\circ 07' 32,59''$	$25^\circ 08' 01,22''$
18	A'_N	0 48 09,38	0 48 31,44	0 50 38,08	0 51 07,15
20	M_{N_L}, M_{N_R}	24 17 07,68	24 17 09,22	24 16 54,51	24 16 54,07
21	$M_{N_{\text{ср}}}$	$24^\circ 17' 08,45''$		$24^\circ 16' 54,29''$	
8	φ	$50^\circ 11' 12,0''$		M_L	$121^\circ 01' 17,98$
3	δ	89 02 37,51		$M_R \pm 180^\circ$	121 01 11,30
13	m	0,026068		M	121 01 14,64
9	$\sec \varphi$	1,561796		$c_{\text{з. п.}}$	+3,34
12	$\operatorname{ctg} \delta$	0,016691		c_N	+4,6
10	$\operatorname{tg} \varphi$	1,199670		M_N	$24^\circ 17' 01,37''$
14	n	0,020024		c_{Nq}	0,00
				δA	-0,32"
11	$0,16'' \cos \varphi$	0,10"		M	121 01 14,64
22	P	3,073		M_N	24 17 01,05
23	q	+0,0005		a	96 44 13,59

Таблица 76

Вычисление астрономического азимута по часовому углу Полярной
со средним моментом наблюдений в приеме
(полная программа, журнал см. в табл. 73)

Прием VIII 12/13 августа 1973 г.
 $\varphi = 50^\circ 11' 12,0''$, $\sec \varphi = 1,561796$, $\operatorname{tg} \varphi = 1,199670$

T_H	$16^h08^m39,5^s$	A_N	$0^\circ 49' 36,98''$
$\alpha - u$	1 51 38,5	Q	95 54 36,76
t^h	14 17 01,0	a	96 44 13,74
t°	$214^\circ 15' 15,0''$	δ	89 02 37,51
$\sin t$	-0,562865	$\operatorname{ctg} \delta$	0,016691
$\cos t$	-0,826548	m	0,026068
$m \sin t$	-0,014673	n	0,020024
$n \cos t - 1$	-1,016551	$\sin A'_N$	0,0144
$\operatorname{tg} A'_N$	+0,014434	$\sin 2A_N$	0,0288
A'_N	$+0^\circ 49' 37,08''$	W	-0,0137
δA	+0,32	ΔA_W	-0,42"
ΔA_W	-0,42		

значений M_N в приеме и выводом среднего значения азимута a направления на земной предмет;

б) вычисление азимута светила A со средним моментом T_H из всех групп визирований в приеме и выводом средних значений M_x (угла Q) и азимута направления a на местный предмет; в этом случае азимут Полярной, вычисленный со средним моментом T_H , необходимо исправить поправкой за ускорение движения светила.

Указанные пути вычислений должны давать принципиально идентичные конечные результаты.

Первый путь обычно применяется при обработке наблюдений, выполняемых по полной программе, когда общий промежуток времени в приеме, затраченный на наблюдение Полярной, превышает 12—15 мин.

В этом случае применение второго пути вычислений нецелесообразно, так как для обеспечения требуемой точности вычислений необходимо учитывать не только поправку за ускорение, но и третьи члены разложения в ряд величин ΔA по степеням ΔT .

По объему вычислений первый путь значительно более трудоемкий, чем второй, особенно при применении обычных вычислительных средств. Поэтому второй путь вычислений целесообразно применять не только для сокращенной, но и для полной программы наблюдений, если промежуток времени на наблюдение Полярной в приеме не превышает 10—12 мин.

Пример вычисления астрономического азимута по часовому углу Полярной с отдельными моментами наблюдений приведен в табл. 75, а со средним моментом наблюдений в приеме в табл. 76 (полная программа) и в табл. 77 (сокращенная программа).

Т а б л и ц а 77

Вычисление астрономического азимута по часовому углу Полярной со средним моментом наблюдений в приеме
(сокращенная программа, журнал см. в табл. 74)

Прием VI 14/15 июля 1975 г.

Направление *Ивановка—Нагорное*

$$\varphi = 44^\circ 58' 37,5'' \quad \sec \varphi = 1,413648 \quad \operatorname{tg} \varphi = 0,999201$$

T_H	16 ^h 41 ^m 32,60 ^s	A_N	0° 49' 19,90"
$\alpha - u$	1 58 37,04	Q	224 24 42,38
t	14 42 55,56	a	225 14 02,28
t^0	220° 43' 53,40"	δ	89 05 53,20
$\sin t$	-0,652515	$\operatorname{ctg} \delta$	0,015742
$\cos t$	-0,757776	m	0,022254
$m \sin t$	-0,014521	n	0,015729
$n \cos t - 1$	-1,011919	δA	+0,32"
$\operatorname{tg} A'_N$	+0,014350	$\sin A'_N$	0,0144
A'_N	0° 49' 19,80"	$\sin 2A'_N$	0,0287
δA	+0,32	W	-0,0138
ΔA_W	-0,22	ΔA_W	-0,22"

Уравненный азимут исправляется поправками за неправильности цапф и приводится к центрам знаков.

При окончательных вычислениях астрономический азимут приводится к среднему полюсу и исправляется сфероидической поправкой.

Расхождение Δa между окончательными значениями прямого и обратного астрономического азимута направления не должно превышать $2,5''$.

Величина Δa вычисляется по формуле

$$\Delta a := (a_{1,2} - a_{2,1} \pm 180^\circ) - (\lambda_1 - \lambda_2) \sin \varphi. \quad (10.15)$$

Геодезический азимут направления вычисляется по формуле Лапласа (9.48) как функция окончательных значений астрономического азимута, астрономических и геодезических координат пункта.

§ 75. ПОНЯТИЕ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ АСТРОНОМИЧЕСКОГО АЗИМУТА ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД В ЭЛОНГАЦИИ

Как известно, при наблюдениях звезд в элонгациях ($q = 90^\circ$) определение астрономического азимута не зависит от погрешностей ΔT , Δu и $\Delta \alpha$, а в среднем из наблюдений светила в восточной и западной элонгациях исключается также и влияние погрешности $\Delta \varphi$. В этом заключаются несомненные достоинства данного способа. Однако при производстве работ в средних и высоких широтах зенитные расстояния звезд в положении элонгации невелики, вследствие чего влияние инструментальных погрешностей при измерении горизонтального направления на светило, как и в способе определения азимута по Полярной, будет значительным по своей величине. Поэтому в отношении исключения влияния инструментальных погрешностей способ определения азимута из наблюдений звезд в элонгациях не имеет существенных преимуществ перед способом определения азимута по наблюдениям Полярной. В смысле же организации и удобства самих наблюдений этот способ безусловно уступает способу определения азимута по часовому углу Полярной, так как здесь наблюдения связаны с довольно редкими явлениями элонгаций, как правило, слабых по блеску звезд.

Сущность способа состоит в измерении горизонтального угла между местным предметом и звездой в положении элонгации. Для каждого измеренного горизонтального угла можно составить уравнение поправок вида

$$\Delta a + b_i x + l_i = v_i \text{ с весом } P_i := \sin^2 z_i, \quad (10.16)$$

где

$$l_i := (a_0 - A_{N_i}) - Q_i;$$

$$A_{N_i} := A'_{N_i} + \delta A_i + \Delta A_{W_i};$$

$$A'_{N_i} := \operatorname{arctg}(\sin \varphi_0 \operatorname{ctg} t_{0_i} - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_i \operatorname{cosec} t_{0_i}^{\text{в}});$$

$$t_i = T_{H_i} + u - \alpha_i.$$

Момент наблюдения светил T_{H_i} и поправку часов u достаточно знать приближенно, с точностью $0,1^m$. Для самого положения элонгации азимут светила можно также вычислять по известной формуле

$$A_{N_i} = \operatorname{arcsin} \frac{\cos \delta_i}{\cos \varphi}. \quad (10.17)$$

Из решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов находят уравненные значения астрономического азимута и широты. В средних и высоких широтах, вследствие малых зенитных расстояний звезд в элонгациях, точность определения астрономического азимута будет невысокой.

Способ определения азимута из наблюдений звезд в элонгациях был предложен великим русским ученым М. В. Ломоносовым в середине XVIII столетия и изложен им в статье «Новый способ очень точный и очень простой находить и описывать полуденную линию»¹.

В последующем способ находил применение при определении азимутов направлений как в нашей стране, так и за рубежом, в частности в США.

§ 76. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ И ДОЛГОТЫ ПУНКТА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ НА n СВЕТИЛ ВБЛИЗИ МЕРИДИАНА

В соответствии с выгоднейшими условиями, вытекающими из формул (9.66) и (9.66'), для определения u с максимальным весом наблюдения светил необходимо производить в меридиане, на малых зенитных расстояниях, симметрично относительно зенита.

При наблюдениях звезд в вертикалах, близких к меридиану, на угловых удалениях от него до $8-10^\circ$ создается возможность наблюдения одной и той же звезды несколькими приемами. Поэтому программу наблюдений на малых зенитных расстояниях вблизи меридиана можно построить из одних ярких звезд и применить способ в условиях незаходящего Солнца.

Сущность и теория данного способа принципиально ничем не отличаются от способа определения азимута из наблюдений звезд в вертикалах, близких к меридиану, изложенного в § 72 настоящей главы. Отличие состоит только в выборе звезд по зенитным расстояниям. Если для определения азимута звезды выбирают на больших зенитных расстояниях ($50^\circ < z < 80^\circ$), то для определения времени и долготы (составляющей η) звезды необходимо выбирать на малых z ($z < 40^\circ$).

¹ Рукописи Ломоносова в АН СССР. — «Труды архива АН СССР», в. 3. М.—Л., изд. АН СССР, 1937.

В табл. 70, 71 и 72 приведен пример определения азимута и долготы (η) по измеренным горизонтальным углам Q'_i между местным предметом и яркими звездами вблизи меридиана. В этом примере выбор звезд по зенитным расстояниям удовлетворяет условиям определения долготы (времени) лучше, чем условиям определения азимута. Методику определения долготы пункта (времени или составляющей η) по измеренным горизонтальным углам Q'_i между местным предметом и светилами, расположенными вблизи меридиана, следует применять только в тех случаях, когда нет уверенности в устойчивости по азимуту столба и теодолита в течение длительного промежутка времени. В данной методике устойчивость столба и теодолита требуется в течение 5—7 мин, необходимых на наблюдение одного приема. Всю совокупность наблюдений из n независимых приемов, необходимых для определения долготы пункта, можно располагать произвольно по отдельным вечерам, а затем производить их совместное уравнение. В этом состоят несомненные достоинства методики определения долготы по измеренным горизонтальным углам Q'_i между местным предметом и светилами вблизи меридиана.

Принципиально для определения времени и долготы можно применить иную методику наблюдений, в которой измеряются не горизонтальные углы Q'_i , а горизонтальные направления на светила N'_i . Точность определения долготы (u, η), в этом случае должна быть выше, чем при измерениях углов Q'_i , так как здесь исключаются погрешности, связанные с измерением горизонтальных направлений на местный предмет.

Измерение горизонтальных направлений производится короткими сериями по 6—8 приемов-звезд, на что уходит 40—60 мин, в течение которых ориентировка горизонтального круга считается неизменной ($M_N^0 = \text{const}$). При современной организации передач секундных сигналов точного времени их прием следует производить не реже чем через один час (при работе с механическим хронометром).

Для каждого приема измерения горизонтального направления составляют уравнение поправок вида (9.40). Если наблюдения каждой звезды производятся в положении явной симметричных относительно меридиана, то в этом случае влиянием члена $b_i x$ можно пренебречь по малости. Уравнение (9.40) в этом случае примет вид

$$\Delta M'_N - c_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i := \sin^2 z_i, \quad (10.18)$$

где

$$l_i = (A'_{0_i} + \delta A_i + \Delta A_{W_i} + \Delta A_{(\text{шк-мх})} + M_N^0) - N'_i.$$

Условный азимут светила A'_{0_i} вычисляют по формуле (10.4) со средним моментом наблюдений в приеме.

Из совместного решения n уравнений поправок для каждой серии приемов находят вероятнейшие значения $\Delta M'_N$ и y и оценивают точность их вывода.

Окончательное значение долготы пункта (составляющей η) выводят как среднее весовое из K серий звезд.

§ 77. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ ПО РАЗНОСТИ ИЗМЕРЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПАР ЗВЕЗД В ВЕРТИКАЛАХ, БЛИЗКИХ К МЕРИДИАНУ

Для ослабления влияния возможных изменений ориентировки горизонтального круга целесообразно наблюдать пары звезд вблизи меридиана. Измерение горизонтальных направлений на звезды в каждой паре занимает 8—10 мин, в течение которых можно не опасаться азимутальных сдвигов теодолита. Для получения составляющей y с наибольшим весом звезды в каждой паре необходимо выбирать на малых ($z < 40^\circ$) и близких между собой ($|z_S - z_N| < 6 \div 8^\circ$) зенитных расстояниях, по одну сторону от меридиана, симметрично относительно плоскости первого вертикала. Условия симметричности имеют вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для пары на востоке} - A_S = 180^\circ - A_N; \\ \text{для пары на западе} - A_S = 540^\circ - A_N. \end{array} \right\} \quad (10.19)$$

При соблюдении указанных условий влияние погрешности принятого при вычислениях значения широты будет пренебрегаемо малым в выводе величины y . С учетом сказанного для каждой пары звезд можно написать два уравнения вида (10.18), решение которых дает следующие значения неизвестных:

$$\Delta M_N = \frac{\Delta_{\Delta M_N}}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta_y}{\Delta}, \quad (10.20)$$

где

$$\Delta = \cos z_N \sin z_S \cos A_N - \sin z_N \cos z_S \cos A_S;$$

$$\Delta_{\Delta M_N} = l_N \sin z_N \cos z_S \cos A_S - l_S \cos z_N \sin z_S \cos A_N;$$

$$\Delta_y = (l_N - l_S) \sin z_N \sin z_S.$$

Подставив значения свободных членов, будем иметь

$$y = \frac{[(A_{0N} - A_{0S}) - (N_N - N_S)] \sin z_N \sin z_S}{\Delta}, \quad (10.21)$$

где

$$A_{0N, S} = A'_{0N, S} + \delta A_{N, S} + \Delta A_{w_{N, S}} + \Delta A_{(\text{шк-мх})_{N, S}}.$$

Выражение (10.21) для вычисления y можно упростить и представить в виде

$$y = \frac{(A_{0N} - A_{0S}) - (N_N - N_S)}{\cos A_N \operatorname{ctg} z_N - \cos A_S \operatorname{ctg} z_S}. \quad (10.22)$$

Вес полученного значения y для каждой пары звезд можно вычислить по формуле

$$P_y = [\cos^2 A \cos^2 z] \approx 2 \cos^2 A_N \cos^2 z_{\text{ср}}. \quad (10.23)$$

Окончательное значение y из n пар звезд, наблюдаемых на пункте, вычисляется как среднее весовое

$$y_{\text{ср}} = \frac{\sum y_i P_{y_i}}{\sum P_{y_i}}. \quad (10.24)$$

Значения η' и λ' вычисляются соответственно по формулам (9.51) и (9.42). Оценка точности производится по известным формулам теории погрешностей, т. е.

$$\mu = \sqrt{\frac{P_i v_y^2}{n-1}},$$

где

$$v_{y_i} = y_{\text{ср}} - y_i,$$

$$M_{y_{\text{ср}}} = -\frac{\mu}{\sqrt{[P_{y_i}]}} ,$$

$$M_{\lambda'} = \frac{1}{15} M_{y_{\text{ср}}} \sec \varphi,$$

$$m_{\eta'} = \sqrt{M_{y_{\text{ср}}}^2 + 15^2 M_L^2 \cos^2 \varphi}.$$

Оценивая способ в целом, следует заметить, что в разности $N'_N - N'_S$ измеренных горизонтальных направлений, при условии наблюдений звезд на близких зенитных расстояниях ($|z_N - z_S| < < 8^\circ$), почти полностью исключается влияние систематических инструментальных погрешностей, действующих на результаты измерений в функции зенитных расстояний светил. Поэтому данный способ можно с успехом применить для точных определений долгот пунктов.

§ 78. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ (ДОЛГОТЫ) ПО ИЗМЕРЕННЫМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ НА ПОЛЯРНУЮ И ЮЖНЫЕ ЗВЕЗДЫ (СПОСОБ СТРУВЕ)

В этом способе в качестве северной звезды пары всегда наблюдается Полярная звезда.

По измеренным горизонтальным направлениям на Полярную и южную звезды можно составить два уравнения вида (9.40), в которых при известной широте пункта φ влиянием членов $b_i x$ можно пренебречь по малости. В данном случае, имея в виду разную методику наблюдений Полярной и южной звезд, полученные уравнения целесообразно решать методом приближений. С приближенным значением $y' = 15 \cos \varphi \Delta u'$ из уравнения для

Полярной находят $\Delta M'_N$. Подставив $\Delta M'_N$ в уравнение для южной звезды, находят более точное значение y и т. д.

Так как вывод азимута Полярной или, что одно и то же, величины M'_N в малой степени зависит от погрешности Δu , а вывод y (Δu) по наблюдениям южной звезды на малом z несущественно зависит от погрешности ΔM_N , то приближения сходятся довольно быстро.

Сущность данного способа не изменится, если вместо одной южной звезды производить наблюдения нескольких южных звезд, замыкаемых наблюдениями Полярной. В этом случае в процессе приближений вместе с Полярной будут участвовать все наблюдаемые южные звезды, по которым выводится усредненное значение y . По уравненному значению y вычисляют долготу пункта или поправку часов.

Данный способ определения поправки хронометра с помощью астрономического теодолита в ином теоретическом изложении был разработан В. Я. Струве в тридцатых годах прошлого столетия, одновременно со способом определения азимута по Полярной. Способ имел широкое применение для определения поправки хронометра в работах по измерению «Дуги меридиана между устьем Дуная и Ледовитым океаном». В этих работах знание поправки хронометра требовалось не для определения долгот пунктов, а для вычисления широт пунктов и азимутов направлений. Точность, с которой определялась поправка хронометра по способу Струве, вполне удовлетворяла способам определения широты, а также способу определения астрономического азимута направлений по часовому углу Полярной. Впоследствии способ Струве иногда применялся и для определения долгот пунктов, преимущественно в широтах, превышающих 65° .

При современной организации астрономических работ способ Струве не имеет преимуществ перед вышеизложенными способами определения долготы по измеренным горизонтальным углам или направлениям на яркие звезды вблизи меридиана.

Заметим, что и сам В. Я. Струве не ставил себе задачей применять этот способ для точных долготных определений.

§ 79. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ НА СВЕТИЛА ВБЛИЗИ ПЕРВОГО ВЕРТИКАЛА

На основании формул (9.65) и (9.65') определения широты с максимальным весом наблюдения светил необходимо производить в первом вертикале, на малых зенитных расстояниях, примерно равным числом приемов по обе стороны от зенита. Практически вес уравненного значения широты останется таким же и при наблюдениях звезд в азимутах, близких к первому вертикалу, на угловых удалениях от него до $8-10^\circ$. В этом случае значительно повышается гибкость способов определения широты,

создается возможность многократных последовательных измерений горизонтальных направлений на одни и те же светила. При этом программу наблюдений для определения широты можно построить из одних ярких звезд, которые можно наблюдать также в светлое время суток.

При определении широты пользуются «Эфемеридами звезд для наблюдений в первом вертикале» и дифференциальными изменениями зенитных расстояний и азимутов светил вблизи первого вертикала. Принципиальное построение различных способов определения широты по наблюдениям звезд вблизи первого вертикала примерно такое же, как и при определении долготы из наблюдений звезд вблизи меридиана.

1. Определение широты по измеренным горизонтальным направлениям на n светил вблизи первого вертикала

Сущность способа состоит в измерении горизонтальных направлений на n светил, выбираемых в соответствии с указанными выше условиями наблюдений, при неизменной ориентировке ($\Delta M'_N = \text{const}$) горизонтального круга. Наблюдения ведутся короткими сериями по 6—8 звезд, заключенными между приемами радиосигналов времени.

В зависимости от требуемой точности для определения широты пункта производятся наблюдения K серий звезд. Между сериями горизонтальный круг переставляется на угол, равный $\frac{180^\circ}{K}$.

Наблюдение каждой серии из 6—8 приемов-звезд занимает 40—60 мин. Общий порядок наблюдений и порядок измерения горизонтального направления на светило в приеме точно такой же, как при измерении горизонтальных направлений на светила вблизи меридиана при определении долготы пункта. Особенностью измерений горизонтальных направлений на светила вблизи первого вертикала является применение позиционного устройства или механизма для вращения трубы по высоте при наблюдении косых прохождений звезд с помощью контактного микрометра. Заметим, что для определения широты можно равноправно применять метод «глаз—ухо». В этом случае наблюдения звезд производятся на постоянных вертикальных нитях сетки.

По результатам измерений n приемов для каждой серии звезд составляется n уравнений поправок вида (9.40), в которых при симметричных наблюдениях каждой звезды относительно первого вертикала можно пренебречь по малости членами $c_i y$, т. е.

$$\Delta M'_N - b_i x + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i. \quad (10.25)$$

Из совместного решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов для каждой серии звезд получают вероятнейшие значения $\Delta M'_N$ и x и оценивают точность их вывода. Окон-

чательные значения широты пункта из K серий звезд, а также оценку точности конечного результата производят по известным формулам среднего весового.

2. Определение широты по разности измеренных горизонтальных направлений пар звезд вблизи первого вертикала

В этом способе независимое определение широты пункта производят по измеренным горизонтальным направлениям двух звезд ($n = 2$) вблизи первого вертикала, на малых зенитных расстояниях.

При этом значительно сокращается промежуток времени, в течение которого полагают ориентировку горизонтального круга неизменной.

Время, необходимое на наблюдение двух звезд, составляет 10—15 мин. Для ослабления влияния погрешностей цапф, систематических погрешностей в определении наклона горизонтальной оси, бокового гнуптия трубы звезды в каждой паре подбираются с малой разностью зенитных расстояний, т. е. так, чтобы $|z_E - z_W| < 8^\circ$. Для исключения погрешности принятого при вычислениях значения долготы пункта звезды в каждой паре целесообразно выбирать по одну сторону от первого вертикала (либо на севере, либо на юге), симметрично относительно плоскости меридиана. Условие симметричности имеет вид

$$A_W = 360^\circ - A_E.$$

С учетом указанных условий из двух уравнений поправок вида (10.25), составленных для звезд каждой пары, получим

$$x = \frac{\Delta_x}{\Delta} = \frac{(l'_W - l'_E) \sin z_E \sin z_W}{\sin z_E \cos z_W \sin A_W - \cos z_E \sin z_W \sin A_E}, \quad (10.26)$$

или

$$x = \frac{(A_{0W} - A_{0E}) - (N'_W - N'_E)}{\sin A_E \operatorname{ctg} z_E - \sin A_W \operatorname{ctg} z_W}. \quad (10.27)$$

Вес полученного значения x определяется приближенной формулой

$$P_x \approx 2 \sin^2 A_E \cos^2 z_{cp}. \quad (10.28)$$

Для получения уравненного значения x и широты пункта из n пар звезд, а также оценки точности конечного результата используют формулы среднего весового. В разности $N'_W - N'_E$ измеренных горизонтальных направлений, при условии $|z_W - z_E| < 8^\circ$, достаточно полно исключается влияние систематических инструментальных погрешностей, действующих в функции зенитных расстояний светил. Поэтому данный способ может быть рекомендован для точных определений широт пунктов.

ГЛАВА 11

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА, ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ (АЗИМУТАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ РАВНЫХ ВЫСОТ)

Азимутальные способы равных высот являются частными случаями способов определения азимута, широты и долготы из наблюдений светил в разных вертикалах и на разных зенитных расстояниях. В этих способах ставится общее ограничивающее условие на выбор звезд по зенитным расстояниям, а именно: звезды в сериях или парах наблюдаются на равных z . При измерении горизонтальных направлений на светила нет надобности абсолютно строго соблюдать равенство их зенитных расстояний, как это делается в способах равных высот зенитальной группы. Здесь вполне достаточно соблюдать равенство зенитных расстояний светил с точностью до нескольких минут градусной меры.

При наблюдениях звезд на равных высотах влияние инструментальных погрешностей, действующих на измеренные горизонтальные направления в функции зенитных расстояний — влияние погрешностей цапф, бокового гнущия трубы, систематических погрешностей в определении наклона горизонтальной оси, остаточного влияния коллимационной ошибки и т. д. — становится одинаковым для всех светил. Применением соответствующей методики наблюдений и вычислений оказывается возможным исключить из результатов определения широты и долготы влияние указанных погрешностей. Вследствие этого определение широты и долготы по измеренным горизонтальным направлениям светил на равных высотах производится с большей точностью, чем при таких же наблюдениях светил на разных высотах. Исключить влияние указанных инструментальных погрешностей из результатов определения азимута направления на местный предмет, или места Севера, по наблюдениям звезд на равных высотах, к сожалению, не удается.

В зависимости от решаемых задач и требуемой точности в этой группе способов, как и в предыдущей, можно применять как способы совместного определения азимута, широты и долготы (составляющих уклонения отвесной линии), так и способы их раздельного определения.

**§ 80. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА,
ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ
ПО ИЗМЕРЕННЫМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ УГЛАМ
МЕЖДУ МЕСТНЫМ ПРЕДМЕТОМ
И СВЕТИЛАМИ В ОДНОМ АЛЬМУКАНТАРАТЕ**

Для совместного определения азимута, широты и долготы с равными весами их уравненных значений наблюдение светил необходимо производить в альмукантарате $z = 35,3^\circ$, при равномерном их расположении по азимутам. Составление эфемерид звезд в данном или любом другом альмукантарате можно производить с помощью звездной карты и номограммы к ней в полярной стереографической проекции (см. приложения 3 и 4). Для альмукантарата $z = 45^\circ$ можно воспользоваться уже готовыми эфемеридами звезд, составленными проф. А. В. Мазаевым для способа равных высот. При наблюдениях звезд в альмукантарате $z = 45^\circ$ вес $P_{a'}$ будет в два раза больше весов P_x и P_y (см. табл. 62).

Сущность способа состоит в измерении горизонтальных углов Q'_i между местным предметом и светилами в момент их прохождения через выбранный для наблюдений альмукантарат.

Для того чтобы среднее зенитное расстояние в приеме из наблюдений при КЛ и КП было близко к $z_{\text{эф}}$, светило на востоке необходимо наблюдать при первом положении теодолита на зенитном расстоянии $z = z_{\text{эф}} + \Delta z$, а при втором положении теодолита — на $z = z_{\text{эф}} - \Delta z$. При наблюдениях светил на западе знаки перед Δz меняются соответственно на обратные. Величина Δz может быть рассчитана по формуле $\Delta z = 15 \cos \varphi \sin A \Delta T$, в которой промежуток ΔT подбирается наблюдателем опытным путем так, чтобы не было спешки в наблюдениях. Как правило, величина ΔT не превышает 3—4 мин. Для каждого приема наблюдений составляется уравнение поправок вида (9.39). Веса уравнений поправок в данном способе будут постоянны, т. е.

$$P_i = \sin^2 z_i = \text{const.}$$

Из решения n уравнений поправок (9.39) по методу наименьших квадратов находят значения $\Delta a'$, x и y , от которых затем по формулам (9.50) и (9.51) переходят к a_r , ξ и η . Уравненные значения широты и долготы вычисляют по формулам (9.41).

Если вычисления производятся с геодезическими координатами пункта B и L , то для каждого независимого приема наблюдений составляется уравнение поправок вида (9.45). Из совместного решения n уравнений поправок (9.45) по методу наименьших квадратов непосредственно находят уравненные значения a_r , ξ и η и оценивают точность их вывода.

§ 81. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЯМ НА n СВЕТИЛ В ОДНОМ АЛЬМУКАНТАРАТЕ

В этом способе вместо горизонтальных углов Q'_i измеряются горизонтальные направления N'_i на светила в одном альмукантарате, при неизменной ориентировке горизонтального круга ($M_N = \text{const}$) за время наблюдения серии из n звезд. Для определения широты и долготы с наибольшими и равными весами их уравненных значений светила необходимо наблюдать в альмукантарате с малым z ($z \ll 30^\circ$), при равномерном их распределении по азимутам.

Для ослабления влияния возможных азимутальных сдвигов столба и теодолита наблюдения производятся короткими сериями по 6—8 звезд, заключенными между приемами радиосигналов времени. В зависимости от требуемой точности для совместного определения широты и долготы пункта производятся наблюдения K серий звезд. Каждая серия может наблюдаться на своем зенитном расстоянии, отличающемся от зенитных расстояний других серий звезд. Между сериями горизонтальный круг теодолита переставляется на угол $\sigma = \frac{180^\circ}{K}$. Общий порядок измерений горизонтальных направлений точно такой же, как при наблюдениях светил на разных высотах, с учетом замечаний для установки трубы по зенитному расстоянию при КП и КЛ, сделанных в предыдущем параграфе. Для каждой наблюдаемой звезды составляется уравнение поправок вида (9.40). Из совместного решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов в каждой серии получают значения искомого величин и оценивают точность их вывода. Окончательные значения неизвестных из K серий звезд получают по формулам среднего весового.

§ 82. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ПО РАЗНОСТЯМ ИЗМЕРЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПАР ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ

В этом способе совместное определение широты и долготы производится по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равных зенитных расстояниях. При этом промежуток времени, в течение которого ориентировку горизонтального круга теодолита полагают неизменной, сокращается до 5—8 мин. Для совместного определения широты и долготы необходимо произвести наблюдения минимум двух пар звезд вблизи плоскостей двух взаимно перпендикулярных вертикалов. В общем случае задача совместного определения широты и долготы решается из наблюдений n пар звезд, где $n \geq 2$.

Для разности измеренных горизонтальных направлений каждой пары звезд на равных высотах на основании (9.40) будем иметь уравнение поправок вида

$$(b_1 - b_2)_i x + (c_1 - c_2)_i y + (l_2 - l_1) = v_i \text{ с весом } P = \frac{1}{2} \sin^2 z_i, \quad (11.1)$$

где

$$b_{1,2} = -\sin A'_{0_{1,2}} \operatorname{ctg} z_i; \quad c_{1,2} = \cos A'_{0_{1,2}} \operatorname{ctg} z_i; \\ (l_2 - l_1)_i = (A_{0_2} - A_{0_1})_i - (N'_2 - N'_1)_i; \quad (11.2)$$

A_{0_1} и A_{0_2} — условные азимуты звезд, вычисленные с предварительными координатами пункта φ_0 и λ_0 и исправленные всеми необходимыми поправками; v_i — поправка разности $(N'_2 - N'_1)_i$ измеренных горизонтальных направлений на звезды пары.

Для удобства решения системы уравнений поправок (11.1) по способу наименьших квадратов введем обозначения

$$(b_1 - b_2)_i = b_i; \quad (c_1 - c_2)_i = c_i; \quad (l_2 - l_1)_i = l_i. \quad (11.3)$$

Система нормальных уравнений, соответствующая n уравнениям поправок (11.1), с учетом приведенных обозначений будет

$$\left. \begin{aligned} [Pbb]x + [Pbc]y + [Pbl] &= 0; \\ [Pbc]x + [Pcc]y + [Pcl] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (11.4)$$

Численные значения неизвестных определяются на основании следующих стандартных формул:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\Delta_x}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta_y}{\Delta}; \\ \varphi &= \varphi_0 + x; \quad \lambda = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \operatorname{sec} \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (11.5)$$

где Δ — определитель системы нормальных уравнений.

Оценка точности производится по известным формулам метода наименьших квадратов:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-2}}; \\ m_x &= \frac{\mu}{\sqrt{P_x}}; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}}; \\ m_\varphi &= m_x; \quad m_\lambda = \frac{1}{15} m_y \operatorname{sec} \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (11.5')$$

где μ — средняя квадратическая погрешность единицы веса, m_x , m_y , m_φ , m_λ — средние квадратические погрешности определяемых величин. Веса уравненных значений определяемых величин находятся по формулам

$$P_x = \frac{\Delta}{\Delta_{11}}; \quad P_y = \frac{\Delta}{\Delta_{22}}; \quad P_\varphi = P_x; \quad P_\lambda = P_y \cos^2 \varphi, \quad (11.6)$$

где Δ_{11} и Δ_{22} — алгебраические дополнения квадратичных элементов определителя Δ системы нормальных уравнений. Подставив в формулы (11.6) значения определителя системы нормальных уравнений и алгебраических дополнений, после несложных преобразований получим:

$$P_x = \frac{1}{2} [\cos^2 z_i (\sin A_2 - \sin A_1)_i^2] - \frac{1}{2} \frac{[\cos^2 z_i (\sin A_2 - \sin A_1)_i (\cos A_1 - \cos A_2)_i]}{[\cos^2 z_i (\cos A_1 - \cos A_2)_i^2]}; \quad (11.7)$$

$$P_y = \frac{1}{2} [\cos^2 z_i (\cos A_1 - \cos A_2)_i] - \frac{1}{2} \frac{[\cos^2 z_i (\sin A_2 - \sin A_1)_i (\cos A_1 - \cos A_2)_i]^2}{[\cos^2 z_i (\sin A_2 - \sin A_1)_i^2]}. \quad (11.8)$$

Совместные определения x и y имеют смысл при равных значениях весов, т. е. при соблюдении условия

$$P_x = P_y. \quad (11.9)$$

Для достижения этого условия на основании формул (11.6) необходимо потребовать при выборе пар звезд соблюдения равенства алгебраических дополнений $\Delta_{11} = \Delta_{22}$ или, что одно и то же,

$$[\cos^2 z_i (\sin A_2 - \sin A_1)_i^2] = [\cos^2 z_i (\cos A_1 - \cos A_2)_i^2]. \quad (11.10)$$

Из формул (11.7), (11.8) и (11.10) следует, что для получения широты и долготы с наибольшими и равными весами наблюдения пар звезд необходимо производить на малых зенитных расстояниях ($z < 40^\circ$) в плоскостях вертикалов, равномерно расположенных по азимутам. При этом звезды в каждой паре должны располагаться в плоскости одного вертикала по разные стороны от зенита. Равенство весов $P_x = P_y$ достигается также в том случае, когда $\frac{n}{2}$ пар звезд наблюдается вблизи плоскости одного вертикала и $\frac{n}{2}$ пар звезд — вблизи плоскости другого вертикала, перпендикулярно к первому.

Для обеспечения непрерывной работы на пункте возможны отступления от указанных выше условий подбора пар звезд. Без значительной потери точности разность азимутов звезд в парах может быть допущена в пределах

$$90^\circ < |A_2 - A_1| < 270^\circ. \quad (11.11)$$

В этом случае для обеспечения равенства весов необходимо, чтобы средние азимуты пар звезд равномерно распределялись по полуокружности. Если обработка наблюдений выполняется по двум парам звезд, то разность средних азимутов этих пар должна

быть близка к 90° . При равномерном распределении вертикалов пар звезд по азимутам, значения весов будут

$$P_x \approx n \cos^2 z_{cp} \text{ и } P_y \approx n \cos^2 z_{cp}. \quad (11.12)$$

Полагая при наблюдениях 2-секундным теодолитом $\mu = 1,3''$, $z_{cp} = 25^\circ$, получим на основании (11.5) и (11.12) число пар звезд n , необходимое для достижения точности, предъявляемой к пунктам Лапласа,

$$n = \left(\frac{\mu}{\cos z_{cp} m_\varphi} \right)^2 = 23. \quad (11.13)$$

Учитывая указанные выше отступления при подборе пар звезд от выгоднейших условий с достаточным запасом надежности, будем иметь

$$n \approx 32 - 36. \quad (11.14)$$

Специальные исследования, выполненные в МИИГАиК Л. В. Неверовым и С. С. Ураловым по подбору и составлению эфемерид равновысотных пар звезд на ЭВМ [49] показали, что для любой территории, в том числе и для районов высоких широт — Арктики и Антарктиды, способ может быть обеспечен достаточным числом равновысотных пар ярких звезд ($m < 3$), со средней плотностью по времени 18—20 пар в час. На этом основании можно полагать, что в смысле организации непрерывных наблюдений на пункте и большей производительности за один и тот же промежуток времени, при обеспечении необходимой точности, данный способ является одним из самых целесообразных способов определения широты и долготы в условиях высоких широт.

§ 83. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА НАПРАВЛЕНИЯ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ПАР ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ

Сущность этого способа состоит в измерении горизонтальных углов Q_i между местным предметом и звездами, группируемыми парно. Для определения азимута направления на земной предмет с максимальным весом звезды в каждой паре выбираются в плоскости любого вертикала, по обе стороны от зенита, на больших ($50^\circ < z < 80^\circ$) и равных зенитных расстояниях. Подбор и составление эфемерид равновысотных пар звезд в общем вертикале производится на ЭВМ по программе, разработанной в МИИГАиК [50]. В основу теории этого вопроса положена следующая аксиома: для любых двух звезд на земной поверхности можно найти пункт с широтой φ , в котором в некоторый момент времени эти звезды будут находиться в общем вертикале на равных высотах.

Общее число таких пар звезд будет равно числу сочетаний из n по 2, где n — число звезд каталога.

Пример определения азимута направления из

Журнал

Пункт Комсомольский II, $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$ $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$ (Мх — Шк) $\frac{R}{2} =$

— 1,42"

Направление Комсомольский II—Телеантенна

Теодолит Трг «Аскания» № 1389 $\frac{\tau}{2} = 0,502''$ $R = 202,96''$

Дата наблюдения: 22.9.1977 г.

Наблюдатель: Н. П. Соплин
(визирование на местный предмет произ-
Пара

Звезда № 31—E

Объект наблюдений	Уровень	Время T	Горизонтальный лимб
Земной предмет		КЛ	55° 26' 57,3"
			26 56,8
Звезда 31—E	6,0—73,5 $\sigma(\text{Л} + \text{П}) = 79,5$ $b^{\partial/2} = -1,75$ $b'' = -0,88$ $z_L = 46^\circ 58'$	21 ^h 23 ^m 57,164 ^s	55° 53' 54,10"
		59,691	2с = 21,50"
		24 02,355	M = 55° 53' 43,35"
		04,503	N = 271 11 18,43
		06,904	Q = 144° 42' 24,92"
		09,316	271 00 32,2
		12,130	271° 00' 04,40"
		14,741	
		21 24 17,011	
		20,221	
22,559			
Звезда 31—E	72,0—4,0 $(\text{Л} + \text{П})_0 = 76,0$ $z = 46^\circ 58'$	$T_L = 21^h 24^m 09,728^s$	
		КП	
		21 ^h 26 ^m 06,989 ^s	N' = 271° 11' 19,25"
		09,504	$\Delta N_b = -0,82$
		12,596	N = 271° 11' 18,43"
		15,951	
		16,830	
		17,921	
		18,777	
		20,344	91° 10' 47,0"
22,553	10 47,1		
25,461	91° 21' 34,10"		
27,793	235° 26' 46,3"		
Земной предмет		$T_R = 21^h 26^m 17,704^s$	26 46,3"
		$T_H = 21 25 13,716$	235° 53' 32,60"
		$\Delta T = 63,9$	
		$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 2,23''$	

наблюдений пар звезд на равных высотах

наблюдений

водилось средней вертикальной нитью)

№ 6

Звезда № 429—W

Объект наблюдений	Уровень	Время T	Горизонтальный лимб
Земной предмет		КП	55° 26' 57,7"
			26 57,2
Звезда 429—W	5,8—73,2 $\sigma(\text{Л} + \text{П}) = 79,0$ $b^{\partial/2} = -1,30$ $b'' = -0,65$ $z = 47^\circ 13'$	21 ^h 37 ^m 35,424 ^s	55° 53' 54,90"
		37,515	2с = 21,10"
		40,396	M = 55° 53' 44,35"
		42,705	N = 90 31 32,45"
		44,585	Q = 325° 22' 11,90"
		45,618	90° 20' 40,8"
		46,327	90 20 40,8
		48,333	
		21 37 50,407	90° 41' 21,60"
		52,824	
55,867			
Звезда 429—W	72,3—4,1 $(\text{Л} + \text{П})_0 = 76,4$ $z = 47^\circ 13'$	$T_R = 21^h 37^m 45,438^s$	
		КЛ	
		21 ^h 39 ^m 39,539 ^s	N' = 90° 31' 33,05"
		42,966	$\Delta N_b = -0,60$
		46,098	N = 90° 31' 32,45"
		48,313	
		50,072	
		51,289	
		52,707	270° 10' 52,2"
		54,219	10 52,3
56,069	270° 21' 44,50"		
58,585	235° 26' 47,0"		
01,191	26 46,8		
Земной предмет		$T_L = 21^h 39^m 50,975^s$	235° 53' 33,80"
		$T_H = 21 38 48,206$	
		$\Delta T = 62,8$	
		$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 2,15''$	

Вычисление условного азимута направления *Комсомольский II—Телеантенна*
 $\sin \varphi_0 = 0,706832$ $\cos \varphi_0 = 0,707381$

Действия	Номер пары	
	Пара № 6	
	Номер звезды	
	31-Е	429-Ш
T	21 ^h 25 ^m 13,716 ^s	21 ^h 38 ^m 48,206 ^s
u_0	+2 00,476	+2 00,476
$\omega (T_H - X)$	+6,858	7,363
s	21 27 21,050	21 40 56,045
α	1 17 41,700	17 45 11,182
t^h	20 00 39,350	3 55 44,863
t°	302° 24' 50,25"	58° 56' 12,90"
δ	27 05 45,90	27 43 86,26
$\operatorname{tg} \delta$	0,511640	0,525917
$\operatorname{ctg} \delta$	-0,634961	0,602360
$\operatorname{cosec} t$	-1,184557	1,167406
$\operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t$	-0,606067	0,613959
$\sin \varphi_0 \operatorname{ctg} t$	-0,448811	0,425767
$\cos \varphi_0 \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t$	-0,428720	0,434303
$\operatorname{ctg} A'_0$	-0,020091	-0,008536
A'_0	91° 09' 03,58"	270° 29' 20,80"
$\Delta A_{\text{Ш}}$	+1,11	-1,04
δA	-0,01	0,00
$(Mx - \text{Шк}) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} z$	-1,94	-1,94
A_0	91° 09' 02,74"	270° 29' 17,82"
Q	144 42 24,92	325 22 11,60
$a'_{1,2}$	235 51 27,66	235 51 29,72
$a' = \frac{a'_1 + a'_2}{2}$	235° 51' 28,69"	
$P_{a'} = 2 \sin^2 z$	1,08	

**Уравнивание результатов определения азимута
по наблюдениям пар звезд на равных высотах**

Пункт *Комсомольский II* $B = 44^{\circ} 58' 32,60''$ $L = 3^{\text{h}} 16^{\text{m}} 35,268^{\text{s}}$

Направление *Комсомольский II — Телеантенна* $m_L = 0,007^{\text{s}}$

Дата определения	Но- мер пары	Но- мер звезд- ды	z	P	Условный азимут a'	v	v^2
22.9.1977	1	22 318	$64^{\circ} 34'$	1,64	$235^{\circ} 51' 28,7''$	$+1,3''$	1,69
	2	64 693	70 00	1,76	27,4	0	0
	3	700 121	74 55	1,86	27,2	$-0,2$	0,04
	4	2 397	48 02	1,11	29,8	$+2,4$	5,76
	5	350 132	70 05	1,77	26,3	$-1,1$	1,21
	6	31 429	47 05	1,08	28,7	$+1,3$	1,69
	7	350 141	74 40	1,86	26,7	$-0,7$	0,49
	8	143 391	66 50	1,70	27,8	$+0,4$	0,16
23.9.1977	9	81 461	48 50	1,13	26,1	$-1,3$	1,69
	10	69 473	46 48	1,07	24,9	$-2,5$	6,25
	11	102 486	46 18	1,05	27,0	$-0,4$	0,16
	12	100 498	45 16	1,02	28,2	$+0,8$	0,64

$$[P] = 17,05$$

$$[pv^2] = 23,81$$

$$a' = \frac{[Pa']}{[P]} = 235^{\circ} 51' 27,38''$$

$$M_{a'} = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{[P](n-1)}} = \sqrt{\frac{23,81}{17,05 \times 11}} = 0,36''$$

Геодезический азимут

$$a_r = a' - 15(\lambda_0 - L) \sin B$$

$$15(\lambda_0 - L) = -11,52$$

$$a' = 235^{\circ} 51' 27,38''$$

$$\sin B = 0,7068$$

$$15(\lambda_0 - L) \sin B = -8,14''$$

$$a_r = 235^{\circ} 51' 35,52''$$

$$M_{a_r} = \sqrt{m_{a'}^2 + 15^2 m_L^2 \sin^2 B} = 0,37''$$

Элементарные расчеты показывают, что для звезд Астрономического Ежегодника СССР для широт нашей страны можно составить эфемериды свыше 400 тысяч равновысотных пар, наблюдаемых в общем вертикале.

Практически эфемериды по указанной выше программе целесообразно вычислять на район предстоящих работ в интервале его крайних широт $\varphi_1 - \varphi_2$. Общий порядок наблюдений и порядок измерения горизонтального угла Q'_i в приеме такой же, как и в других способах определения азимута направления.

Для каждой пары выбранных таким образом звезд будем иметь два равновесных уравнения поправок вида (9.39), из решения которых получим условный азимут направления на местный предмет по формуле

$$a' = \frac{A_{01} + A_{02}}{2} + \frac{Q'_1 + Q'_2}{2} \text{ с весом } P_{a'} = 2 \sin^2 z. \quad (11.15)$$

Результаты определения азимута в каждой паре звезд будут свободны от влияния погрешностей условных составляющих уклонения отвесной линии x и y . Уравненное значение условного азимута из наблюдений n пар звезд вычисляется по формуле среднего весового

$$a'_{\text{ср}} = \frac{\sum a'_i P_{a'_i}}{\sum P_{a'_i}} \text{ с весом } P'_{\text{ср}} = \sum P_{a'_i}. \quad (11.16)$$

Переход от условного азимута к геодезическому азимуту направления на земной предмет осуществляется по формуле (9.50). Пример определения азимута из наблюдений пар звезд на равных высотах приведен в табл. 78—80.

§ 84. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ПО РАЗНОСТИ ИЗМЕРЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ДВУХ ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ

Для определения широты с максимальным весом звезды каждой пары необходимо выбирать вблизи первого вертикала, на малых зенитных расстояниях, при соблюдении условия симметричности положения звезд относительно плоскости меридиана.

Аналитическое выражение условия симметричности выбора звезд по азимутам в каждой паре имеет вид

$$A_W = 360^\circ - A_E.$$

Без заметного уменьшения точности удаления звезд по азимуту от первого вертикала может достигать $20-30^\circ$.

Как видно, выгоднейшие условия определения широты по измеренным горизонтальным направлениям для пар звезд на равных высотах совпадают с выгоднейшими условиями определения времени способом Цингера.

Поэтому для определения широты данным способом можно воспользоваться уже готовыми эфемеридами пар ярких звезд, применяемыми для наблюдений в способе Цингера.

По измеренным горизонтальным направлениям для каждой пары звезд будем иметь два равновесных уравнения вида (9.40). При соблюдении условия симметричности из решения двух уравнений (9.40) получим

$$x = \frac{\Delta_x}{\Delta} = \frac{(l_W - l_E) \sin^2 z}{\sin z \cos z (\sin A_E - \sin A_W)}.$$

После подстановки значений свободных членов будем иметь окончательно

$$x = \frac{[(A_{0W} - A_{0E}) - (N'_W - N'_E)] \operatorname{tg} z}{\sin A_E - \sin A_W}, \quad (11.17)$$

с весом $P_x = 2 \sin^2 A_E \cos^2 z$.

Уравненное значение x из наблюдений n пар звезд вычисляется по формуле среднего весового, т. е.

$$x_{\text{cp}} = \frac{\sum x_i P_{x_i}}{\sum P_{x_i}}, \quad \varphi = \varphi_0 + x_{\text{cp}}, \quad (11.18)$$

с весом $P_\varphi = P_{x_{\text{cp}}} = \sum P_{x_i}$.

Оценка точности производится по известным формулам теории погрешностей. Разность горизонтальных направлений $N'_W - N'_E$ при наблюдениях звезд пары на равных z может быть измерена как при двух, так и при одном положении вертикального круга теодолита. В обоих случаях в разности $N'_W - N'_E$ полностью исключаются погрешности, связанные с погрешностями цапф, боковым гнутием трубы, систематическими погрешностями в определении наклона горизонтальной оси и коллимацией.

Поэтому данный способ может быть применен для самых точных определений широты пункта.

Пример определения широты данным способом приведен в табл. 81—83.

В высоких широтах число пар ярких звезд ($m < 3$), удовлетворяющее условиям симметричности, мало и совершенно недостаточно для обеспечения непрерывной работы на пункте. Поэтому в этих условиях при определении широты приходится вынужденно подбирать пары звезд с нарушением условий симметричности. В этом случае задача раздельного определения широты практически не отличается от изложенной в § 82 задачи совместного определения φ и λ . Так, для определения широты нужно произвести наблюдения n равновысотных пар ярких звезд вблизи первого вертикала и решить соответствующую им систему уравнений поправок (11.1) по методу наименьших квадратов. При указанном выборе пар звезд по азимуту вес P_x уравненного значения широты будет близок к максимальному, а вес P_y будет мал.

Пример определения широты по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равных высотах

Ж у р н а л н а б л ю д е н и й

Пункт Комсомольский II, $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$ $\lambda_0 = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,50^{\text{s}}$ Теодолит Трг «Аскания» № 1389, $\frac{\tau}{2} = 0,502''$, $R = 202,96''$, (Шк — Мх) $\frac{R}{2} = -1,42'$ Дата наблюдений 13.9.1977 г., поправка цифрочечатающего хронографа $u_0 = -41,094^{\text{s}}$, в момент $X = 22^{\text{h}}44,2^{\text{m}}$, часовой ход $\omega = +10,081$

Наблюдатель Н. П. Сокин

Звезда № 55—E $z = 39^\circ 22'$, $\text{ctg } z = 1,219$

Звезда № 474—W

КЛ Уровень		КП		КЛ		КП	
75,1—8,5	83,6	4,0—71,0	75,0	71,0—4,5	75,5	8,0—74,5	82,5
75,1—8,5	83,6	4,0—71,0	75,0	71,0—4,5	75,5	8,0—74,5	82,5
	83,60		75,00		75,50		82,50
$b\delta/2 = +4,30$	$\Delta N_b = 4,30 \times 0,502 \times 1,219 = +2,62''$			$b\delta/2 = 3,50$	$\Delta N_b = 3,50 \times 0,502 \times 1,219 = -2,133'$		
$22^{\text{h}}45^{\text{m}}58,946^{\text{s}}$		$22^{\text{h}}48^{\text{m}}30,031^{\text{s}}$		$22^{\text{h}}51^{\text{m}}05,803^{\text{s}}$		$22^{\text{h}}54^{\text{m}}51,180^{\text{s}}$	
46 01,602		32,713		09,240		54,278	
05,419		33,765		12,809		57,159	
08,748		38,824		15,731		55 00,834	
11,637		42,177		18,111		03,565	
14,550		46,063		22,041		04,434	
17,340		47,965		25,058		05,469	
21,155		51,819		28,309		07,181	
27,305		54,684		31,840		10,422	
24,629		58,637		34,941		13,255	
31,511		61,775		38,249		17,190	
$T_L = 22^{\text{h}}46^{\text{m}}14,829^{\text{s}}$		$T_R = 22^{\text{h}}48^{\text{m}}45,437^{\text{s}}$		$T_L = 22^{\text{h}}51^{\text{m}}22,009^{\text{s}}$		$T_R = 22^{\text{h}}55^{\text{m}}04,053^{\text{s}}$	
$T_H = 22^{\text{h}}47^{\text{m}}30,133^{\text{s}}$	$\Delta T = 75,30^{\text{s}}$; $5,454 \left(\frac{\Delta T}{100}\right)^2 = 3,09''$			$T_H = 22^{\text{h}}53^{\text{m}}13,031^{\text{s}}$	$\Delta T = 111,0^{\text{s}}$; $5,454 \left(\frac{\Delta T}{100}\right)^2 = 6,72''$		
Горизонтальный лимб				Горизонтальный лимб			
266° 24' 31,7 δ		87° 06' 23,8 δ		92° 07' 15,0 δ		272° 25' 12,9 δ	
24 31,7		06 23,4		07 15,0		25 12,7	
266 49 03,40		87° 12' 47,20''		92° 14' 30,00''		272° 50' 25,60''	
$N_E = 267^\circ 00' 55,30'' + 2,62'' = 267^\circ 00' 57,92''$				$N_W = 92^\circ 32' 27,80'' - 2,13'' = 92^\circ 32' 25,67''$			

Вычисление широты п. Комсомольский II
 $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$, $\sin \varphi_0 = 0,706832$, $\cos \varphi_0 = 0,707381$

Обозначения	Пара № 972	
	$z = 39^\circ 22'$	$\operatorname{tg} z = 0,8204$ $\operatorname{cosec} z = 1,517$
	Номер звезды	
	55—E	474—W
T_H	22 ^h 47 ^m 30,133 ^s	22 ^h 53 ^m 13,031 ^s
u_0	-41,094	-41,094
$\omega (T_H - X)$	+0,504	+1,512
s	22 46 49,543	22 52 33,449
α	2 07 37,066	19 30 34,506
t^h	20 39 12,477	3 21 58,943
t°	309° 48' 07,15"	50° 29' 44,14"
δ	34 50 08,53	34 23 06,55
$\operatorname{tg} \delta$	0,695942	0,684333
$\operatorname{ctg} t$	-0,833228	0,824465
$\operatorname{csc} t$	-1,301640	1,296050
$\operatorname{tg} \delta \operatorname{csc} t$	-0,905866	0,886930
$\sin \varphi_0 \operatorname{ctg} t$	-0,588952	0,582758
$\cos \varphi_0 \operatorname{tg} \delta \operatorname{csc} t$	-0,640792	0,627397
$\operatorname{ctg} A'_0$	+0,051840	-0,044639
A'_0	87° 01' 56,73"	272° 33' 21,43"
ΔA_W	+1,54	-3,36
δA	+0,02	+0,01
$(Шк - Мх) \frac{R}{2} \operatorname{csc} z$	-2,24	-2,24
A_0	87° 01' 56,05"	272° 33' 15,84"
$A_{0W} - A_{0E}$	185° 31' 19,79"	
$N_W - N_E$	185° 31' 27,75"	
$[(A_{0W} - A_{0E}) -$ $-(N_W - N_E)] \operatorname{tg} z$	-6,54"	
$\sin A_{0E}$	0,9987	
$\sin A_{0W}$	-0,9990	
$\sin A_{0E} - \sin A_{0W}$	1,9977	
x	-3,27"	

**Уравнивание результатов определения широты
по наблюдениям пар звезд на равных высотах**

Пункт *Комсомольский II*, $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$; $B = 44^\circ 58' 32,60'' \pm 0,05''$

Дата наблюдения	Номер пары	z	A_E	P_{x_i}	x_i	v	v^2
13.9.1977 г.	956/455	40° 44'	87,0°	0,86	-3,4"	-0,2"	0,04
	964/469	31 31	75,2	1,45	-3,2	0,0	0,0
	972	39 22	87,1	1,18	-3,3	-0,1	0,01
	978/481	37 05	71,3	1,15	-2,6	+0,6	0,36
	986	43 29	85,3	1,07	-2,9	+0,3	0,09
	992/494	27 29	93,6	1,58	-4,1	-0,9	0,81
14.9.1977 г.	947/445	48 19	68,5	0,78	-3,3	-0,1	0,01
	951	39 58	78,9	1,14	-2,8	+0,4	0,16
	955/452	35 15	96,8	1,34	-4,2	-1,0	1,0
	958/457	31 26	89,3	1,46	-1,8	+1,4	1,96
	961/465	29 37	84,4	1,58	-2,7	+0,5	0,25
	964/469	31 27	73,6	1,34	-3,0	+0,2	0,04
	969/475	26 20	66,7	1,36	-2,9	+0,3	0,09
	976	41 20	92,7	1,12	-3,7	-0,5	0,25
	989/492	28 13	91,4	1,56	-3,5	-0,3	0,09

$$[P_{x_i}] = 18,97 \quad [Pv^2] = 7,55$$

$$x_{\text{ср}} = \frac{[P_{x_i}x_i]}{[P_{x_i}]} = -3,22''$$

$$\varphi = \varphi_0 + x = 44^\circ 58' 40,00'' - 3,22'' = 44^\circ 58' 36,78''$$

$$\xi = x + (\varphi_0 - B) = -3,22'' + 7,40'' = +4,18''$$

$$m_x = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{[P](n-1)}} = \sqrt{\frac{7,55}{18,97 \cdot 14}} = 0,17''$$

$$M_\varphi = m_x = 0,17''$$

$$M_\xi = \sqrt{m_x^2 + m_B^2} = 0,18''$$

**§ 85. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ (ВРЕМЕНИ)
ПО РАЗНОСТИ ИЗМЕРЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ
НАПРАВЛЕНИЙ ДВУХ ЗВЕЗД НА РАВНЫХ ВЫСОТАХ**

Способ определения долготы (времени) по разности измеренных горизонтальных направлений двух звезд на равных высотах отличается от предыдущего способа определения широты только условиями выбора звезд по азимутам. Если для определения широты звезды выбирались вблизи первого вертикала, то для определения долготы (времени), в соответствии с формулой (9.66), звезды в парах выбираются вблизи меридиана, на малых зенитных расстояниях, по обе стороны от зенита.

Так как в самом меридиане трудно подобрать пары звезд на равных z , то без особого ущерба точности звезды в парах подби-

раются на удалении от меридиана до 30—40°. Чтобы при этом вес P_y был максимален и погрешность в принятом при вычислениях значении широты не оказывала влияния на точность вывода долготы (времени), звезды в паре необходимо выбирать по одну сторону от меридиана, симметрично относительно плоскости первого вертикала, т. е. при соблюдении условий симметричности

$$A_S = 180^\circ - A_N \text{ — для пары на востоке}$$

и

$$A_S = 540^\circ - A_N \text{ — для пары на западе.}$$

Как видно, выгоднейшие условия определения λ (u) данным способом практически совпадают с выгоднейшими условиями определения широты по способу Певцова. Поэтому здесь можно воспользоваться уже готовыми эфемеридами пар звезд, применяемыми для наблюдений способом Певцова.

Общий порядок наблюдений и порядок измерения горизонтальных направлений в приеме здесь практически такой же, как и в других азимутальных способах определения долготы, изложенных выше. При наблюдениях светил на равных зенитных расстояниях можно применять методику измерения горизонтальных направлений как при двух, так и при одном положении вертикального круга теодолита.

При соблюдении условий симметричности из решения двух уравнений поправок (9.40) получим

$$y = \frac{\Delta_y}{\Delta} = \frac{[(A_{0N} - A_{0S}) - (N'_N - N'_S)] \operatorname{tg} z}{\cos A_N - \cos A_S} \text{ с весом } P_y = \\ = 2 \cos^2 A_N \cos^2 z. \quad (11.19)$$

Уравненное значение y из наблюдений n пар звезд вычисляется по формуле среднего весового

$$y_{\text{ср}} = \frac{\sum y_i P_{y_i}}{\sum P_{y_i}} \text{ с весом } P_{y_{\text{ср}}} = \sum P_{y_i}. \quad (11.20)$$

Пользуясь уравненным значением y , вычисляют составляющую отклонения отвесной линии в первом вертикале

$$\eta' = y_{\text{ср}} + 15 (\lambda_0 - L) \cos \varphi,$$

долготу пункта

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi \text{ с весом } P_{\lambda'} = P_{y_{\text{ср}}} \cos^2 \varphi$$

или поправку хронометра в момент X между приемами радиосигналов времени двух станций.

Журнал определения долготы по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равных высотах

Пункт Комсомольский II $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0''$ $\lambda_0 = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,50^{\text{s}}$ Теодолит Трг «Аскания» № 1389 $\frac{\tau}{2} = 0,502''$ $R = 202,96''$ (Мх — Шк) $\frac{R}{2} = -1,42''$ Дата 19 сентября 1977 г. Поправка цифropечатающего хронографа, полученная из приема радиосигналов времени $u_0 = -11^{\text{m}}15,260^{\text{s}}$ в момент $X = 23^{\text{h}}17,1^{\text{m}}$, часовой ход хронографа $\omega = +10,088^{\text{s}}$

Наблюдатель Н. П. Соколин

П а р а № 242

Звезда 425 — N; $z_N = 38^\circ 07'$; $\text{ctg } z_N = 1,275$ $z_{\text{CP}} = 37^\circ 56'$ Звезда 500 — S; $z_S = 37^\circ 44'$; $\text{ctg } z_S = 1,292$

КЛ	
77,0—6,0	83,0
77,0—6,0	83,0
	<u>83,00</u>
$b\delta/2 = +4,80$	
21 ^h 39 ^m 33,493 ^s	
	57,290
40	21,902
	49,196
41	12,916
	37,739
	55,276
42	34,036
43	01,284
	22,256
	51,351
<hr/>	
$T_L = 21^{\text{h}}41^{\text{m}}39,704^{\text{s}}$	
$T_H = 21^{\text{h}}45^{\text{m}}56,333^{\text{s}}$	
	149° 20 03,4 ^d
	20 03,6
<hr/>	
149° 40' 07,00"	

КП	
1,2—72,2	73,4
1,2—72,2	73,4
	<u>73,40</u>
$\Delta N_b = 4,80 \cdot 0,502 \cdot 1,275 = +3,07''$	
21 ^h 47 ^m 24,891 ^s	
	48 01,391
	29,512
49	04,560
	36,096
50	09,273
	45,959
51	15,330
	53,886
52	31,176
53	10,510
<hr/>	
$T_R = 21^{\text{h}}50^{\text{m}}12,962^{\text{s}}$	
$\Delta T = 256,63^{\text{s}}; 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 35,91''$	
	329° 13 23,4 ^d
	13 23,0
<hr/>	
329° 26' 46,40"	

КЛ	
77,0—5,0	82,0
75,0—5,0	82,0
	<u>82,0</u>
$b\delta/2 = 0,0$	
21 ^h 57 ^m 13,106 ^s	
	14,674
	16,281
	17,600
	19,424
	20,635
	21,990
	23,552
	25,169
	26,410
	28,062
<hr/>	
$T_L = 21^{\text{h}}57^{\text{m}}20,627^{\text{s}}$	
$T_H = 21^{\text{h}}58^{\text{m}}28,929^{\text{s}}$	
	31° 01 09,4 ^d
	01 09,2
<hr/>	
31° 02' 18,60"	

КП	
5,0 — 77,0	= 82,0
5,0 — 77,0	= 82,0
	<u>82,0</u>
$\Delta N_b = 0,0''$	
21 ^h 59 ^m 29,811 ^s	
	31,298
	32,636
	33,977
	35,595
	37,035
	38,800
	40,211
	42,033
	43,369
	44,590
<hr/>	
$T_R = 21^{\text{h}}59^{\text{m}}37,232^{\text{s}}$	
$\Delta T = 68,30^{\text{s}}; 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 2,54''$	
	211° 24 52,8 ^d
	24 52,5
<hr/>	
211° 49' 45,30"	

 $N_N = 149^\circ 33' 26,70'' + 3,07'' = 149^\circ 33' 29,77''$ $N_S = 31^\circ 26' 06,95''$

Вычисление условной составляющей y

$$\varphi_0 = 44^\circ 58' 40,0'', \quad \sin \varphi_0 = 0,706832, \quad \cos \varphi_0 = 0,707381$$

Действия	Номер пары	
	Пара 242 $z_{\text{CP}} = 37^\circ 56'$; $\text{tg } z = 0,7794$; $\text{cosec } z = 1,6267$	
	Номер звезды	
	425—N	500—S
T_H	21 ^h 45 ^m 56,333 ^s	21 ^h 58 ^m 28,929 ^s
u_0	—11 15,260	—11 15,260
$\omega (T_H - X)$	— 15,435	—13,417
s	21 34 25,638	21 47 00,252
α	17 37 08,231	20 31 40,484
t^h	3 57 17,407	1 15 19,768
t°	59° 19' 21,10"	18° 49' 56,55"
δ	68 46 35,16	11 11 35,15
$\text{tg } \delta$	2,575010	0,197880
$\text{ctg } t$	0,593225	2,932050
$\text{cosec } t$	1,162719	3,087890
$\text{tg } \delta \text{ cosec } t$	2,994013	0,613010
$\sin \varphi_0 \text{ ctg } t$	0,419510	2,072467
$\cos \varphi_0 \text{ tg } \delta \text{ cosec } t$	2,117908	0,433632
$\text{ctg } A'_0$	—1,698398	1,638835
A'_0	329° 30' 38,00"	211° 23' 28,00"
ΔA_W	+22,34	—3,30
δA	+0,28	—0,28
$(M_X - \text{Шк}) \frac{R}{2} \text{ cosec } z$	—2,31	—2,31
A_0	329° 30' 58,31"	211° 23' 22,11"
$A_{0N} - A_{0S}$	118° 07' 36,20"	
$N_N - N_S$	118 07 22,82	
$(A_{0N} - A_{0S}) - (N_N - N_S)$		+13,38
$I = [(A_{0N} - A_{0S}) - (N_N - N_S)] \text{ tg } z$		+10,43
$\cos A_{0N}$		0,8618
$\cos A_{0S}$		0,8536
$II = \cos A_{0N} - \cos A_{0S}$		1,7154
$y = \frac{I}{II}$		+6,08"

**Уравнивание результатов определения долготы
по наблюдениям пар звезд на равных высотах**

Пункт *Комсомольский II*, $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$ $L = 3^h 16^m 35,268^s \pm 0,007^s$

Дата	Номер пары	z	A_N	P	y	v	v^2
19.9.1977	242	37° 56'	329,5°	0,92	+6,1"	+1,3"	1,69
	252	24 56	18,4	1,50	+3,8	-0,6	0,36
	260	22 37	341,2	1,53	+5,2	+0,8	0,64
	263	31 43	32,8	1,02	+3,4	-1,0	1,00
	266	22 02	24,5	1,44	+4,3	-0,1	0,01
	4	40 53	331,6	0,91	+5,6	+1,2	1,44
	8	43 27	342,6	0,97	+6,4	+2,2	4,84
	21.9.1977	12	18 45	22,3	1,58	+3,2	-1,2
222		30 28	19,3	1,32	+4,1	-0,3	0,09
223		44 34	344,1	0,93	+5,4	+1,0	1,00
228		44 22	23,6	0,88	+3,6	-0,8	0,64
229		41 10	328,8	0,84	+2,8	-1,6	2,56
234		36 10	336,5	1,12	+4,3	-0,1	0,01
248		45 07	17,4	0,91	+4,2	-0,2	0,04

$$[P_y] = 15,87 \quad y_{cp} = 4,40'' \quad [Pv^2] = 16,1988$$

$$y_{cp} = \frac{[y_i P_{y_i}]}{[P_y]} = +4,40''$$

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y_{cp} \sec \varphi = 3^h 16^m 34,500^s + \frac{4,40}{15} 1,4137 = 3^h 16^m 34,915^s$$

$$\eta' = y_{cp} + 15 (\lambda_0 - L) \cos B = 4,40'' - 15 \cdot 0,768^s \cdot 0,7074 = -3,75''$$

$$m_y = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{[P] (n-1)}} = \sqrt{\frac{16,20}{15,87 \times 13}} = 0,28''$$

$$M_{\lambda'} = \frac{1}{15} m_y \sec \varphi = 0,026^s$$

$$M_{\eta'} = \sqrt{m_y^2 + 15^2 m_L^2 \cos^2 B} = 0,29''$$

Оценку точности производят по известным формулам теории погрешностей. В разности $N'_N - N'_S$, как и в предыдущем способе, полностью исключается влияние систематических приборных погрешностей. Поэтому данный способ можно считать одним из точных способов определения долгот пунктов.

Пример определения долготы пункта по разности измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равной высоте приведен в табл. 84—86.

В условиях высоких широт, как и в предыдущем способе, пары ярких звезд ($m < 3$) можно подбирать с нарушением условий симметричности и с последующим уравниванием результатов наблюдений по методу наименьших квадратов. При выборе звезд в парах вблизи меридиана вес P_x будет мал, а вес P_y будет близок к максимальному значению.

ГЛАВА 12

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА, ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ГРУПП ЗВЕЗД В ПЛОСКОСТИ ОДНОГО ВЕРТИКАЛА (СПОСОБЫ РАВНЫХ АЗИМУТОВ)

Способы равных азимутов, как и азимутальные способы равных высот, являются частными случаями первой группы способов, основанных на наблюдениях светил в разных вертикалах и на разных зенитных расстояниях. В данной группе способов на выбор звезд по азимутам накладывается общее ограничение: серии или пары звезд наблюдаются в плоскости одного вертикала, симметрично относительно зенита. В зависимости от характера решаемых задач и требуемой точности здесь, как и в предыдущих группах, можно применять как способы совместного определения азимута, широты и долготы, так и способы их раздельного определения. При этом для совместного определения широты и долготы наблюдаются две группы звезд в плоскостях двух произвольных, взаимно перпендикулярных вертикалов.

Наряду с применением методики измерения горизонтальных углов Q_i между светилами и местным предметом в этой группе способов можно применять методику наблюдений моментов прохождений светил через вертикал местного предмета или через вертикал специально выставляемой миры. В этом случае азимут направления на местный предмет или миру будет численно равен азимуту светила, вычисленному со средним моментом наблюдений, с учетом приборных поправок. При применении этой методики наблюдений светил отпадает надобность в производстве отсчетов по горизонтальному лимбу прибора, вследствие чего в результатах наблюдений исключаются погрешности, связанные с отсчетами по горизонтальному лимбу, — систематические и случайные погрешности диаметров лимба, погрешности отсчетных приспособлений, собственные погрешности отсчета по лимбу и т. д. Поэтому способы определения азимута, широты и долготы, основанные на применении указанной методики наблюдений светил, дают результаты более точные, чем при измерении горизонтальных углов Q_i или при измерении горизонтальных направлений на светила N_i . Для точных определений азимута, широты и долготы из наблюдений моментов прохождений светил через плоскости данных вертикалов можно применять приборы с грубым горизонтальным лимбом, а также приборы, вообще не имеющие гори-

зонтального круга, например пассажиры и инструменты. В соответствии с выгоднейшими условиями, вытекающими из формул (9.64)—(9.66), для определения времени (долготы) пассажирный инструмент ориентируется в плоскости меридиана, а для определения широты — в плоскости первого вертикала. Пассажирный инструмент следует применять также для определения точных эталонных или фундаментальных азимутов направлений на земной предмет, идея создания которых принадлежит Ф. Н. Красовскому. Для этой цели с помощью пассажирного инструмента необходимо наблюдать прохождения звезд через плоскость вертикала местного предмета.

В настоящей главе весьма кратко будут рассмотрены наиболее целесообразные способы определения азимута, широты и долготы (времени) из наблюдений групп звезд в плоскости данного вертикала.

§ 86. СОВМЕСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА, ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ГРУПП ЗВЕЗД В ПЛОСКОСТЯХ ДВУХ ВЕРТИКАЛОВ

Для совместного определения азимута, широты и долготы звезды необходимо наблюдать в плоскостях двух любых, взаимно перпендикулярных вертикалов, симметрично относительно зенита, на среднем зенитном расстоянии $z = 35,3^\circ$. При этом принципиально возможно применить две различные методики наблюдений.

Первая методика основывается на обычном измерении горизонтальных углов Q'_i между светилами и местным предметом. В этом случае сущность способа (производство наблюдений и вычислений) практически ничем не отличается от способа совместного определения a , φ и λ из наблюдений светил в бл и з и плоскостей двух взаимно перпендикулярных вертикалов, изложенного в главе 10.

Особенностью наблюдений является то, что для измерения горизонтального направления на светило при КЛ и КП рассчитываются предварительно углы встречи светил по азимуту, так чтобы в средний момент T_H наблюдения в приеме светило находилось примерно в плоскости данного вертикала. Расчет угла встречи в общем случае производится по формуле

$$\Delta A' = 15 (\sin \varphi - \cos \varphi \cos A \operatorname{ctg} z) \Delta T^m.$$

Величину ΔT^m принимают, как правило, равной 3—4 мин. Наблюдая светило при первом положении теодолита с учетом угла встречи $\Delta A'$ до данного вертикала, а при втором положении теодолита на таком же угловом удалении $\Delta A'$ после данного вертикала, среднее горизонтальное направление в приеме и средний момент T_H будут отнесены к плоскости данного вертикала. Измерение горизонтального направления на светило при КЛ и КП

в плоскости данного вертикала можно производить не только с расчетом угла встречи $\Delta A'$, но и на искусственно создаваемой коллимации с помощью боковых вертикальных нитей сетки или подвижной вертикальной нити контактного микрометра. В этом случае для измерения горизонтального направления на светило верхняя часть теодолита устанавливается на отсчет горизонтального лимба, соответствующий азимуту данного вертикала (с учетом предварительного значения M_N^0). Подвижная нить контактного микрометра отводится от нуля-пункта навстречу видимому движению светила на 4—5 оборотов. Наблюдается прохождение светила на 1—2 оборотах винта контактного микрометра (или на 3—5 боковых нитях специальной сетки, если наблюдение производится без контактного микрометра). Отсчитывается горизонтальный лимб. До и после наблюдения светила отсчитывается накладной на горизонтальную ось уровень. Затем труба переводится через зенит, и верхняя часть теодолита поворачивается ровно на 180° .

Производится наблюдение светила на тех же оборотах винта контактного микрометра, но в обратном направлении (на тех же боковых нитях). Отсчитываются горизонтальный лимб и уровень. В этом случае среднее горизонтальное направление в приеме в средний момент T_H будет также соответствовать положению светила в плоскости данного вертикала. При совместном определении азимута, широты и долготы методом измерения горизонтальных углов Q_i между светилами и местным предметом наиболее целесообразными вертикалами для наблюдений светил являются меридиан и первый вертикал. Для этих вертикалов наиболее просто составляют эфемериды звезд, пользуясь средними местами АЕ и «Эфемеридами для наблюдений звезд в первом вертикале».

Вторая методика наблюдений при совместном определении азимутов направлений, широты и долготы основана на наблюдениях прохождений светил через плоскости вертикалов двух местных предметов, угол между которыми равен примерно 90° . Без особого ущерба точности угол между плоскостями вертикалов может отступать от прямого до 20 — 30° . Эфемериды звезд для наблюдений в плоскостях вертикалов местных предметов составляются с помощью ЭВМ или звездной карты в полярной стереографической проекции и номограммы к ней (прил. 3 и 4).

Для составления эфемерид предварительно определяются азимуты направлений на земные предметы с точностью $1'$ любым приближенным способом.

Данная методика наблюдений предпочтительнее первой, так как измерение горизонтального угла между светилом и местным предметом здесь не связано с отсчетами горизонтального лимба.

Действительно, при наблюдениях светила в вертикале местного предмета малый горизонтальный угол Q между светилом и

предметом можно представить как разность измеренных горизонтальных направлений

$$Q = M - N,$$

где

$$M = \frac{L_{\Delta} + (R_{\Delta} \pm 180^{\circ})}{2} \pm \frac{(m_L - 10^{06}) - (m_R - 10^{06})}{2} \mu \operatorname{cosec} z_{\Delta} +$$

$$+ b_{\Delta} \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_{\Delta} + \Delta M_{\text{ц}},$$

$$N = \frac{L^* + (R^* \pm 180^{\circ})}{2} + b_{\text{ср}}^* \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_{\text{ср}}^* + c^* q + \Delta N_{\text{ц}}.$$

Очевидно, при наблюдениях светила в вертикале местного предмета

$$L_{\Delta} = L^* \text{ и } R^* = R_{\Delta},$$

поэтому

$$Q = M - N = \frac{m_L - m_R}{2} \mu \operatorname{cosec} z_{\Delta} + b_{\Delta} \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_{\Delta} +$$

$$+ \Delta M_{\text{ц}} - \left(b_{\text{ср}}^* \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_{\text{ср}}^* + c^* q + \Delta N_{\text{ц}} \right). \quad (12.1)$$

Если зенитное расстояние местного предмета отличается от 90° не более чем на 1° , то можно полагать

$$\operatorname{cosec} z_{\Delta} = 1, \quad \operatorname{ctg} z_{\Delta} \approx 0,$$

следовательно,

$$Q = \pm \frac{m_L - m_R}{2} \mu - b_{\text{ср}}^* \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_{\text{ср}}^* - c^* q + (\Delta M_{\text{ц}} - \Delta N_{\text{ц}}). \quad (12.2)$$

Формулы (12.1) и (12.2) служат для вычисления малого горизонтального угла Q между светилом и местным предметом при наблюдениях с контактным микрометром. В этих формулах, как видно, отсутствуют отсчеты горизонтального лимба.

Порядок измерения малого горизонтального угла Q в каждом приеме следующий:

диаметр 0° — 180° горизонтального круга астрономического теодолита ориентируют в вертикале местного предмета нулем — в направлении на местный предмет;

за 4—5 мин до момента s прохождения светила через плоскость данного вертикала делают три наведения подвижной нитью контактного микрометра на местный предмет вблизи нуль-пункта гребенки; записывают соответствующие отсчеты по головке контактного микрометра; определение наклона горизонтальной оси производится в том случае, если $h_{\Delta} > 1^{\circ}$;

не сбивая ориентировки верхней части теодолита по азимуту, устанавливают трубу теодолита по зенитному расстоянию светила, выбранному из эфемерид (или на дополнение z до 360°);

при появлении звезды в поле зрения трубы отсчитывают накладной на горизонтальную ось уровень и перекладывают его (при определении среднего наклона горизонтальной оси в приеме уровень можно и не перекладывать). Подвижную нить контактного микрометра перемещают на пять оборотов навстречу видимому движению звезды; вращая наводящий винт трубы, добиваются такого положения, чтобы изображение звезды прошло через отсчет шкалы позиционного устройства, равный параллактическому углу светила. Если теодолит снабжен механизмом для вращения трубы по высоте, то изменяя напряжение, подаваемое на моторчик, добиваются того, чтобы звезда перемещалась в поле зрения трубы параллельно средней горизонтальной нити и вблизи от нее;

при подходе звезды к нити микрометра включают хронограф, вращая маховички привода контактного микрометра, удерживают изображение звезды на подвижной нити в пределах 1,5—2 оборотов винта с автоматической записью моментов контактирования на ленте хронографа. Вторично отсчитывают уровень;

верхнюю часть теодолита поворачивают ровно на 180°. При этом установка теодолита по азимуту производится все время на штрихах лимба 0° или 180°. Устанавливают трубу по зенитному расстоянию той же звезды (или на 360° — z);

отсчитывают накладной на горизонтальную ось уровень и перекладывают его;

при подходе звезды к подвижной нити включают хронограф и наблюдают (биссектируют) прохождение звезды на тех же оборотах контактного микрометра, но в обратном направлении; вторично отсчитывают уровень;

не сбывая верхней части теодолита, по азимуту производят визирование на местный предмет, т. е. делают три наведения подвижной нитью микрометра на местный предмет с соответствующими отсчетами по головке микрометра.

Группы из k независимых приемов замыкаются приемами радиосигналов времени. Пример журнала наблюдений и его обработки приведен в табл. 87.

Для каждого малого горизонтального угла Q'_i составляют уравнение поправок вида (9.39) или (9.45).

$$\Delta a' + b_i x + c_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i,$$

$$b_i = -\sin A'_i \operatorname{ctg} z_i, \quad c_i = \cos A'_i \operatorname{ctg} z_i, \quad l_i = (a_0 - A_{0_i}) - Q'_i,$$

$$A_{0_i} = A'_i + \Delta A_{W_i} + \delta A_i + \Delta A_{(\text{шк-мх})},$$

$$A'_i = \operatorname{arcctg} (\sin \varphi_0 \operatorname{ctg} t_{0_i} - \cos \varphi_0 \operatorname{tg} \delta_i \operatorname{cosec} t_{0_i}),$$

$$t_{0_i} = T_{H_i} + u_0 + \omega (T_{H_i} - X) - \alpha_i.$$

Журнал

Определения азимута направления из наблюдений звезд в вертикале местного предмета

Пункт *Гороховский*, $\varphi_0 = 55^\circ 45' 40''$, $\cos \varphi_0 = 0,5626$ Направление *Гороховский—Лабораторный*, $a_0 = 341^\circ 13' 30''$, $\sin a_0 = -0,3219$, $\cos a_0 = +0,9468$ Теодолит ДКМ-3А № 87990, $\frac{\tau}{2} = 0,862''$, $\mu = 0,9647''$, (Шк — Мх) $\frac{R}{2} = +0,60'$ Коллимация для середины оборота $c = -521''$.Дата: 4/5.5.1967 г. Наблюдатель *А. В. Нагульный*

П р и е м 7

Звезда 125N $z^* = 25^\circ 50' 0''$ $\operatorname{ctg} z^* = 2,0655$ $\frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z = 1,7805''$ $z_{\Delta} = 89^\circ 52'$ $\mu \operatorname{cosec} z_{\Delta} = 0,9647''$ $15 \cos \varphi_0 \sin a_0 = 2,6321$

Объект наблюдения	Отсчет по окулярному микрометру	Уровень	Хронометр	Вспомогательные вычисления
Мира	10^{06} $34,8^{\delta}$ 35,4 36,4	КЛ		$z_L = z - 15 \cos \varphi_0 \sin a_0 \Delta T =$ $= 25^\circ 50,0' - 3,4' = 25^\circ 46,6'$ $z_R = z + 15 \cos \varphi_0 \sin a_0 \Delta T =$ $= 25^\circ 50,0' + 3,4' = 25^\circ 53,4'$ $\operatorname{cosec} z_L = 2,2996$ $\operatorname{cosec} z_R = 2,2902$
125—N	10^{06} $35,5^{\delta}$	$13,0-28,2$ $15,0-30,0$ <hr/> $14,00-29,10$	$14^{\text{h}}36^{\text{m}}25,42^{\text{s}}$ 26,79 28,34	

		43,10	30,40 32,94 35,12 36,31 38,20 39,58	$q = \frac{1}{2} (\operatorname{cosec} z_L - \operatorname{cosec} z_R) = +0,0047$ $cq = -2,45''$ $Q = \pm \frac{m_L - m_R}{2} \mu \operatorname{cosec} z_{\Delta} - \Delta N_b - cq$ $Q = +7,38'' + 4,81'' + 2,45'' = 14,64''$ $\frac{R}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) \operatorname{cosec} z = +1,38''$
125—N		КП $27,2-11,8$ $25,7-10,7$ <hr/> $26,45-11,25$	$14^{\text{h}}38^{\text{m}}59,06^{\text{s}}$ 39 00,74 01,72 03,41 05,60 07,89 09,45 10,78 12,50	$W = k_1 \sin a_0 - k_2 \sin 2a_0$ $k_1 = 0,954$ $k_2 = 1,511$ $k_1 \sin a_0 = -0,3071$ $k_2 \sin 2a_0 = -0,9209$ <hr/> $W = +0,6138$
Мира	10^{06} $21,2^{\delta}$ 20,2 19,5		$T_L = 14^{\text{h}}36^{\text{m}}32,567^{\text{s}}$ $T_R = 14^{\text{h}}39^{\text{m}}05,683^{\text{s}}$	$\Delta A_W = 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 W = +1,96''$ $\delta A = 0,32'' \cos \varphi \cos a_0 \operatorname{csc} z = +0,39''$
	10 20,3			$T_H = 14^{\text{h}}37^{\text{m}}49,12^{\text{s}}$ $\Delta T = 1^{\text{m}}16,56^{\text{s}}$ $\Delta N_b = -4,81''$
		$\frac{m_L - m_R}{2} = +7,65^{\delta}$ $b^{\delta/2} = \frac{37,70 - 43,10}{2}$		
		$b^{\delta/2} = -2,70$		
		$\frac{m_L - m_R}{2} \mu \operatorname{cosec} z = +7,38''$		
		$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 3,196''$		

При наблюдениях светил в вертикале, совпадающем с направлением на местный предмет, для вычисления коэффициентов b_i и c_i можно принять

$$A'_{0_i} = a_0,$$

а в противоположном вертикале —

$$A'_{0_i} = a_0 \pm 180^\circ.$$

Поэтому значения коэффициентов можно также вычислять по формулам

$$b_i = \mp \sin a_0 \operatorname{ctg} z_i^*;$$

$$c_i = \pm \cos a_0 \operatorname{ctg} z_i^*,$$

в которых верхние знаки соответствуют наблюдениям светил в вертикале, совпадающем с направлением на местный предмет, а нижние — в противоположном вертикале.

При совместных определениях азимута, широты и долготы, выполненных в вертикалах двух земных предметов, имеют две серии уравнений поправок, соответствующих азимутам этих направлений.

Для вертикала предмета 1 будем иметь n_1 уравнений поправок вида

$$\Delta a'_i \pm (y \cos a_{0_1} - x \sin a_{0_1}) \operatorname{ctg} z_{1,i} + l_{1,i} = v_{1,i}$$

$$\text{с весом } P_{1,i} = \sin^2 z_{1,i}; \quad (i_1 = 1, 2, \dots, n_1) \quad (12.3)$$

для вертикала предмета 2 будет n_2 уравнений поправок аналогичного вида

$$\Delta a'_i \pm (y \cos a_{0_2} - x \sin a_{0_2}) \operatorname{ctg} z_{2,i} + l_{2,i} = v_{2,i}$$

$$\text{с весом } P_{2,i} = \sin^2 z_{2,i}. \quad (i_2 = 1, 2, \dots, n_2) \quad (12.4)$$

В формулах (12.3) и (12.4) верхние знаки соответствуют наблюдениям светил в вертикале, совпадающем с направлением на местный предмет, а нижние — в противоположном вертикале.

В общем случае задача определения a'_1 , a'_2 , x и y может быть осуществлена путем совместного решения $n = n_1 + n_2$ уравнений поправок по методу наименьших квадратов.

Однако решение может быть и иным, а именно: отдельно решают n_1 уравнений поправок, составленных для вертикала предмета 1; из этого решения находят уравненные значения условного азимута направления a'_1 и условного уклонения отвесной линии в вертикале, перпендикулярном к данному,

$$W_1 = y \cos a_{0_1} - x \sin a_{0_1}.$$

Таким же образом решают n_2 уравнений поправок, составленных для звезд, наблюдаемых в вертикале предмета 2. Из этого решения находят соответственно a'_2 и

$$W_2 = y \cos a_{0_2} - x \sin a_{0_2}.$$

Далее из совместного решения уравнений

$$W_1 = y \cos a_{0_1} - x \sin a_{0_1};$$

$$W_2 = y \cos a_{0_2} - x \sin a_{0_2}$$

находят условные составляющие уклонения отвесной линии x и y

$$x = \frac{W_1 \cos a_{0_2} - W_2 \cos a_{0_1}}{\sin (a_{0_2} - a_{0_1})}, \quad (12.5)$$

$$y = \frac{W_1 \sin a_{0_2} - W_2 \sin a_{0_1}}{\sin (a_{0_2} - a_{0_1})}. \quad (12.6)$$

Анализ формул (12.5) и (12.6) подтверждает, что погрешности величин x и y при их совместном определении будут наименьшими, если $a_{0_2} - a_{0_1} = 90^\circ$, т. е. при наблюдениях групп звезд в плоскостях двух взаимно перпендикулярных вертикалов.

Оценка точности уравненных значений определяемых неизвестных при совместном решении $n = n_1 + n_2$ уравнений поправок производится по известным формулам метода наименьших квадратов.

При раздельном решении двух групп уравнений поправок оценка точности для каждой группы производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \sqrt{\frac{[Pv_{1,i}^2]}{n_1 - 2}}; \\ m_{a'_1} &= \frac{\mu_1}{\sqrt{P_{a'_1}}}; \\ m_{W_1} &= \frac{\mu_1}{\sqrt{P_{W_1}}} \end{aligned} \right\} \quad (12.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_2 &= \sqrt{\frac{[Pv_{2,i}^2]}{n_2 - 2}}; \\ m_{a'_2} &= \frac{\mu_2}{\sqrt{P_{a'_2}}}; \\ m_{W_2} &= \frac{\mu_2}{\sqrt{P_{W_2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (12.8)$$

Вычисление свободных членов уравнений поправок
(По наблюдениям звезд в вертикале местного предмета)

Пункт *Гороховский* $\varphi_0 = 55^\circ 45' 40''$ $\sin \varphi_0 = 0,826699$
 $\lambda_0 = 3^h 30^m 39,5^s$ $\cos \varphi_0 = 0,562645$
 $a_0 = 341^\circ 13' 30''$

Обозначения	Номер звезды	
	392S	125N
T_H	15 ^h 07 ^m 45,73 ^s	14 ^h 37 ^m 49,12 ^s
u_0	-37,79	-37,79
$\omega (T_H - X)$	-0,75	-0,53
s	15 07 07,19	14 37 10,80
α	16 12 34,96	4 45 07,65
t_0^h	22 54 32,20	9 52 03,15
t_0°	343° 38' 03,00"	148° 00' 47,25"
δ	-3 36 39,70	+56 42 05,30
$\operatorname{tg} \delta$	-0,063108	+1,522440
$\operatorname{ctg} t_0$	-3,405201	-1,601150
$\operatorname{cosec} t_0$	-3,549002	+1,887771
$\sin \varphi_0 \operatorname{ctg} t_0$	-2,815077	-1,323669
$\cos \varphi_0 \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t_0$	+0,126014	+1,617051
$\operatorname{ctg} A'_0$	-2,941091	-2,940720
A'_0	161° 13' 17,45"	341° 13' 09,32"
δA	-0,20	+0,39
ΔA_{W}	+1,85	+1,96
$\frac{1}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) \operatorname{cosec} z$	+0,71	+1,38
A_{0i}	161° 13' 19,81"	341° 13' 13,05"
Q_i	180 00 06,86	+14,64
a_i	341 13 26,67	341 13 27,69
a_0	341 13 30,00	
l_i	+3,3"	+2,3"

Пример совместного определения азимутов, широты и долготы из наблюдений групп звезд в плоскостях вертикалов двух местных предметов

Пункт *Троица*, $\varphi_0 = 56^\circ 04' 00,0''$, $\lambda_0 = 2^{\text{h}}30^{\text{m}}03,00^{\text{s}}$
 Направление I *Троица—Ивановка*, $a_{0_1} = 205^\circ 09' 55,0''$
 Направление II *Троица—Петровка*, $a_{0_2} = 288^\circ 26' 35,0''$
 Дата с. 23. 7. по 3.8.1977 г.

1. Уравнения поправок для вертикала предмета I
 (Троица—Ивановка, $a_0 = 205^\circ 09' 55,0''$)

Номер приема	Номер звезды	P	$a = 1$	$b = \pm \text{ctg } z$	l	$a \sqrt{P}$	$b \sqrt{P}$	$l \sqrt{P}$	s	$v_{1, i}$
1	485 S	0,63	+1	+0,776	-0,98"	+0,790	+0,613	-0,77"	+0,633	-1,66"
2	134 N	0,75	1	-0,616	+0,65	+0,864	-0,532	+0,56	+0,892	+1,36
3	129 N	0,60	1	-0,813	-2,08	0,775	-0,630	-1,61	-1,465	-0,66
4	471 S	0,68	1	+0,688	+0,90	0,823	+0,566	+0,74	+2,129	-0,11
5	485 S	0,63	1	+0,776	-0,01	0,790	+0,613	-0,01	+1,393	-0,93
6	516 S	0,56	1	+0,889	+2,11	0,748	+0,665	+1,58	+2,993	+0,58
7	480 S	0,55	1	+0,906	+2,11	0,741	+0,671	+1,56	+2,972	+0,55
8	178 N	0,53	1	-0,935	-2,43	0,730	-0,682	-1,77	-1,722	-0,74
9	519 S	0,65	1	+0,743	+1,56	0,803	+0,596	+1,25	+2,649	+0,35
10	134 N	0,72	1	-0,629	-2,54	0,846	-0,532	-2,15	-1,836	-1,35
11	197 N	0,75	1	-0,587	-1,74	0,863	-0,506	-1,50	-1,143	-0,74
12	510 S	0,45	1	+1,105	+1,06	0,670	+0,741	+0,71	+2,121	-0,41
13	134 N	0,72	1	-0,629	-2,38	0,846	-0,532	-2,01	-1,696	-1,21
14	134 N	0,72	1	-0,629	-2,16	0,846	-0,532	-1,83	-1,516	-1,03
15	463 S	0,49	1	+1,017	+1,04	0,701	+0,713	+0,73	+2,144	-0,34
16	197 N	0,75	1	-0,578	+0,99	0,866	-0,500	+0,08	+0,446	+0,83
17	129 N	0,60	1	-0,812	+1,69	0,777	-0,630	+1,31	+1,457	+2,26
18	178 N	0,53	1	-0,934	-1,80	0,730	-0,682	-0,95	-0,902	+0,08
19	519 S	0,65	1	-0,753	+1,33	0,803	+0,596	+1,07	+2,469	+0,17
20	532 S	0,57	1	+0,879	+2,21	0,751	+0,660	+1,66	+3,071	+0,67

Нормальные уравнения

	a]	b]	l]	s]
[Pa [Pb [Pl	+12,487	+0,225 +7,530	-1,597 +11,215 +35,496	+11,115 +18,970 +45,114
Контроль	+1,971	-11,594	+9,618	-9,623

$$\Delta = [Paa] [Pbb] - [Pab]^2 = 94,027 - 0,051 = 93,976$$

$$\Delta'_{a_1} = [Pab] [Pbl] - [Pbb] [Pal] = 2,523 + 12,025 = +14,548$$

$$\Delta_{W_1} = [Pal] [Pab] - [Paa] [Pbl] = -0,359 - 140,042 = -140,401$$

$$\Delta a'_1 = \frac{\Delta a'_1}{\Delta} = \frac{14,548}{93,976} = +0,155'' \quad W_1 = \frac{\Delta_{W_1}}{\Delta} = \frac{-140,401}{93,976} = -1,495''$$

$$P'_{a_1} = \frac{\Delta}{[Pbb]} = \frac{93,976}{7,530} = 12,48 \quad P_{W_1} = \frac{\Delta}{[Paa]} = \frac{93,976}{12,487} = 7,52$$

$$[Pv^2] = [Pl] + [Pal] \Delta a'_1 + [Pbl] W_1 = +35,496 - 0,248 = 18,48$$

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-2}} = \sqrt{\frac{18,48}{18}} = 1,01''$$

$$m'_{a_1} = \frac{\mu_1}{\sqrt{P'_{a_1}}} = \frac{1,01''}{\sqrt{12,48}} = 0,29''$$

$$m_{W_1} = \frac{\mu_1}{\sqrt{P_{W_1}}} = \frac{1,01''}{\sqrt{7,52}} = 0,37''$$

Уравнения поправок для вертикала предмета 2
(Троица—Петровка $a_{0_2} = 288^\circ 26' 35,0''$)

Номер приема	Номер звезды	P	$a = 1$	$b = \pm \operatorname{ctg} z$	l_i	$\alpha \sqrt{P}$	$b \sqrt{P}$	$l \sqrt{P}$	s	$v_{2, i}$
1	12 E	0,465	+1	-1,072	+2,33"	+0,682	-0,731	+1,59"	+1,541	+0,89"
2	417 W	0,705	1	+0,647	-1,20	0,839	+0,543	-1,01	+0,372	-0,19
3	402 W	0,695	1	+0,659	-2,40	0,834	+0,550	-2,00	-0,616	-1,17
4	433 W	0,695	1	+0,662	-2,53	0,834	+0,552	-2,11	-0,724	-1,28
5	55 E	0,340	1	-1,392	+1,77	0,583	-0,812	+1,03	+0,801	+0,22
6	476 W	0,367	1	+1,316	-3,64	0,605	+0,796	-2,20	-0,799	-1,14
7	712 E	0,336	1	-1,410	-0,28	0,579	-0,816	-0,16	-0,397	-0,98
8	712 E	0,336	1	-1,410	+0,97	0,579	-0,816	+0,56	+0,323	-0,26
9	350 W	0,670	1	+0,703	-0,61	0,818	+0,575	-0,50	+0,893	+0,36
10	394 W	0,473	1	+1,056	+1,88	0,687	+0,725	+1,29	+2,702	+2,29
11	374 W	0,708	1	+0,646	-0,99	0,840	+0,542	-0,83	+0,552	-0,01
12	12 E	0,465	1	-1,072	+2,19	1,682	-0,731	+1,49	+1,441	+0,80
13	11 E	0,368	1	-1,312	+2,42	0,606	-0,795	+1,47	+1,281	+0,69
14	27 E	0,327	1	-1,438	+0,79	0,571	-0,821	+0,45	+0,200	-0,37
15	405 W	0,791	1	+0,496	+0,22	0,890	+0,441	+0,20	+1,531	+0,91
16	55 E	0,340	1	-1,392	-0,22	0,583	-0,812	-0,13	-0,359	-0,94

Нормальные уравнения

	a]	b]	l]	s]
$[Pa]$ $[Pb]$ $[Pl]$	+8,074	-0,167 +7,905	-1,644 -9,125 +25,484	+6,263 -1,387 +14,715
Контроль	+1,795	+8,968	-10,769	+10,763

$$\Delta = 63,825 - 0,028 = +63,797$$

$$\Delta_{a_2'} = +1,524 + 12,996 = +14,520 \quad \Delta_{w_2'} = +0,275 + 73,675 = +73,950$$

$$\Delta a_2' = \frac{\Delta_{a_2'}}{\Delta} = \frac{14,520}{63,797} = +0,227'' \quad W_2 = \frac{\Delta_{w_2'}}{\Delta} = \frac{73,950}{63,797} = +1,159''$$

$$P_{a_2'} = \frac{\Delta}{[Pbb]} = \frac{63,797}{7,905} = 8,08 \quad P_{w_2} = \frac{\Delta}{[Paa]} = \frac{63,797}{8,074} = 7,90$$

$$[Pv^2] = [Pll] + [Pal] \Delta a_2' + [Pbl] W_2 = 25,484 - 0,373 - 10,576 = 14,535$$

$$\mu_2 = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-2}} = \sqrt{\frac{14,535}{14}} = 1,02''$$

$$m_{a_2'} = \frac{\mu_2}{\sqrt{P_{a_2'}}} = \frac{1,02}{\sqrt{8,08}} = 0,36''; \quad m_{w_2} = \frac{\mu_2}{\sqrt{P_{w_2}}} = \frac{1,02}{\sqrt{7,90}} = 0,36''$$

1. Вычисление геодезических азимутов направлений

$$a_{\Gamma} = a' - (\lambda_0 - L) \sin B + (\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a') \operatorname{ctg} z_{\Delta}.$$

Координаты пункта Троица:

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= 56^{\circ} 04' 00,00'', & \lambda_0 &= 37^{\circ} 30' 45,00'' \\ \sin B &= 0,8297 & B &= 56^{\circ} 04' 01,500'', & L &= 37^{\circ} 30' 45,750'' \\ \cos B &= 0,5582 & \xi_0 &= \varphi_0 - B = -1,50'', & \lambda_0 - L &= -0,75'' \\ & & & & (\lambda_0 - L) \sin B &= -0,62'' \\ & & & & \eta_0 &= (\lambda_0 - L) \cos B = -0,42'' \end{aligned}$$

Направление Троица—Ивановка

$$\begin{aligned} a'_1 &= 205^{\circ} 09' 55,16''; & m_{a'_1} &= 0,29'' \\ z_{\Delta} &= 89^{\circ} 45,5' & \operatorname{ctg} z_{\Delta} &= 0,0039 \\ a_{\Gamma_1} &= 205^{\circ} 09' 55,16'' + 0,62'' - 0,001'' = 205^{\circ} 09' 55,78''; & m_{a_{\Gamma_1}} &= 0,29''. \end{aligned}$$

Направление Троица—Петровка

$$\begin{aligned} a'_2 &= 288^{\circ} 26' 35,23''; & m_{a'_2} &= 0,36'' \\ z_{\Delta} &= 89^{\circ} 32,5' & \operatorname{ctg} z_{\Delta} &= 0,0080 \\ a_{\Gamma_2} &= 288^{\circ} 26' 35,23'' + 0,62'' - 0,012'' = 288^{\circ} 26' 35,84''; & m_{a_{\Gamma_2}} &= 0,36''. \end{aligned}$$

II. Вычисление астрономо-геодезических составляющих уклонения отвесной линии

$$x = \frac{W_1 \cos a'_2 - W_2 \cos a'_1}{\sin (a'_2 - a'_1)} = \frac{-0,473'' + 1,049''}{0,9931} = +0,58''$$

$$\xi = x + \xi_0 = -0,92'',$$

$$m_x^2 = \frac{m_{W_1}^2 \cos^2 a'_2 + m_{W_2}^2 \cos^2 a'_1}{\sin^2 (a'_2 - a'_1)}, \quad m_x = 0,35'', \quad m_\xi = 0,35'',$$

$$y = \frac{W_1 \sin a'_2 - W_2 \sin a'_1}{\sin (a'_2 - a'_1)} = \frac{+1,418'' + 0,493''}{0,9931} = +1,93'',$$

$$\eta' = y + \eta_0 = +1,51'',$$

$$m_y^2 = \frac{m_{W_1}^2 \sin^2 a'_2 + m_{W_2}^2 \sin^2 a'_1}{\sin^2 (a'_2 - a'_1)}; \quad m_y = 0,38''; \quad m_\eta = 0,38''$$

III. Вычисление широты и долготы пункта

$$\varphi_0 = 56^\circ 04' 00,00''$$

$$\lambda_0 = 3^h 30^m 03,000^s$$

$$x = +0,58$$

$$\frac{1}{15} y \sec \varphi = +0,230$$

$$\varphi' = 56^\circ 04' 00,58''$$

$$\lambda' = 3^h 30^m 03,230^s$$

$$M_{\varphi'} = m_x = 0,35'' \quad M_{\lambda'} = \frac{1}{15} m_y \sec \varphi = 0,045^s$$

Средние квадратические погрешности уравненных значений x и y вычисляются в этом случае на основании выражений:

$$m_x^2 = \frac{m_{W_1}^2 \cos^2 a'_{0_2} + m_{W_2}^2 \cos^2 a'_{0_1}}{\sin^2 (a'_{0_2} - a'_{0_1})} \quad (12.9)$$

$$m_y^2 = \frac{m_{W_1}^2 \sin^2 a'_{0_2} + m_{W_2}^2 \sin^2 a'_{0_1}}{\sin^2 (a'_{0_2} - a'_{0_1})}. \quad (12.10)$$

По уравненным значениям условных азимутов a'_1 и a'_2 на основании формулы (9.50) вычисляют геодезические азимуты направлений на предметы 1 и 2.

По уравненным значениям x и y на основании формул (9.51) вычисляют астрономо-геодезические составляющие уклонения отвесной линии ξ и η , а по формулам (9.41) — астрономические координаты пункта φ и λ . Оценку точности производят по формулам (9.59)—(9.62).

Пример вычисления свободных членов уравнений поправок представлен в табл. 88, а уравнивание результатов наблюдений групп звезд в двух вертикалах — в табл. 89—90.

§ 87. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА НАПРАВЛЕНИЯ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ПРОХОЖДЕНИЙ ЗВЕЗД В ВЕРТИКАЛЕ МЕСТНОГО ПРЕДМЕТА

В соответствии с выгоднейшими условиями, вытекающими из формулы (9.49), определение условного (геодезического) азимута направления на земной предмет можно производить из наблюдений светил в плоскости любого произвольного вертикала, на больших зенитных расстояниях ($50^\circ < z < 80^\circ$), симметрично относительно зенита.

Одним из самых эффективных и точных способов определения азимута является способ, основанный на наблюдениях прохождений светил в плоскости вертикала местного предмета.

Сущность способа состоит в том, что в момент T_H прохождения светила через вертикал местного предмета измеряется малый горизонтальный угол Q'_i между светилом и местным предметом. Как и в предыдущем способе, измерение малого горизонтального угла Q'_i производится без отсчетов горизонтального лимба, вследствие чего точность определения азимута этим способом будет выше, чем другими способами, в которых измерение угла Q'_i связано с отсчетами горизонтального лимба.

Для каждого измеренного угла Q'_i составляется уравнение поправок вида (12.3)

$$\Delta a' \pm W \operatorname{ctg} z_i + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i,$$

Журнал определения геодезического азимута из наблюдений звезд в меридиане

Пункт Комсомольский II $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40''$ $\lambda_0 = 3^h 16^m 35,00^s$ Направление Комсомольский—Нагорное $a_0 = 225^\circ 14' 10''$ Прибор теодолит ДКМ-3А № 87990 $\frac{\tau}{2} = 0,862''$ $\mu = 0,9647''$

$$\frac{1}{2} (Mx - Шк) = -0,60''$$

Наблюдатель А. В. Наугольный

Дата 27 июня 1975 г.

П р и е м 4 Звезда 683 S

$$s = 18^h 56^m \quad z = 60^\circ 07,9' \quad \operatorname{ctg} z = 0,4424 \quad \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z = 0,3813''$$

$$\mu \operatorname{cosec} z_{\Delta} = 0,9647''$$

Объект наблюдения	Окулярный микрометр	Хронометр	Уровень	Горизонтальный лимб	(M - 10°б)	Направления
Фонарь Нагорное	10 ⁰⁵ 27,1 ^d	КЛ		225° 12' 32,8" 33,2		
	27,1 27,3					
	10 27,17			225 12 33,00	+26,24"	225° 12' 59,24"

683S		18 ^h 57 ^m 15,68 ^s 16,34 17,05 17,76 18,80 20,32	35,9—24,1 39,0—27,8 37,45—25,95 63,40	180° 30' 00,0" 00,0 180 30 00,00		
		18 57 20,97 21,78 22,50				N' = 180° 00' 08,40" ΔN _b = +6,14
		$T_L = 18^h 57^m 19,022^s$				N = 180 00 14,54
683S		18 ^h 52 ^m 19,38 ^s 20,33 21,12 21,94 23,28 24,40 25,30 26,35 27,28	КП 9,9—21,4 9,8—21,3 9,85—21,35 31,20	359° 30' 16,7" 16,9 359 30 16,80		
		27,28	$b^{d/2} = +16,10$ ΔN _b = +6,14"			
		$T_R = 18^h 53^m 23,253^s$				
Фонарь Нагорное	10 ⁰⁶ 20,5 ^d 19,7 19,3			45° 13' 21,4" 21,2		45° 13' 02,20"
	10 19,83			45 13 21,30	-19,10"	2c = -2,96"
$T_H = 18^h 55^m 21,138^s$						M = 225° 13' 00,72" N = 180 00 14,54
						Q' = 45° 12' 46,18"

в котором

$$W = (y \cos a_0 - x \sin a_0), \quad l_i = (a_0 - A_{0i}) - Q'_i,$$

$$A_{0i} = A'_{0i} + \Delta A_W + \delta A_i + \Delta A_{(\text{Шк-Мк})};$$

$$A'_{0i} = \text{arcctg} (\sin \varphi_0 \text{ctg } t_{0i} - \cos \varphi_0 \text{tg } \delta \text{cosec } t_{0i}).$$

Из решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов находят уравненные значения a' и W и оценивают точность их вывода. Далее по формуле (9.50) вычисляют геодезический азимут направления и производят оценку точности конечного результата.

Пример уравнивания азимута из наблюдений звезд в вертикале местного предмета приведен в табл. 87—90.

§ 88. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА НАПРАВЛЕНИЯ НА ЗЕМНОЙ ПРЕДМЕТ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД В МЕРИДИАНЕ

По сравнению с другими вертикалами меридиан представляет некоторые удобства для определения азимута, так как видимое движение светил в момент кульминации происходит перпендикулярно к плоскости вертикала, что позволяет для точных азимутальных определений применять контактный микрометр без дополнительного позиционного устройства. Кроме того, для наблюдений в меридиане очень просто составляются рабочие эфемериды звезд и существенно облегчается вычисление азимута светила. Благодаря этому данный способ представляет определенный практический интерес. В настоящее время он рекомендован инструкцией для непосредственного определения геодезических азимутов в астрономо-геодезической сети СССР. Идея способа определения азимута из наблюдений звезд в меридиане была известна давно. В частности, это способ находил широкое применение в прошлом столетии при развитии астрономо-геодезической сети Англии, Индии, а также в нашей стране, при проложении дуги меридиана под руководством В. Я. Струве. Азимуты сторон триангуляции в указанных работах определялись с помощью пассажного инструмента из наблюдений звезд в вертикале миры, установленной в меридиане.

При наблюдениях с астрономическим теодолитом сущность данного способа определения азимута состоит в измерении горизонтального угла Q' между местным предметом и светилами в моменты их прохождения через меридиан. Для определения азимута с максимальным весом его уравненного значения светила необходимо наблюдать на больших зенитных расстояниях ($50^\circ < z < 80^\circ$), примерно равным числом, по обе стороны от зенита.

Для измерения горизонтального направления на светило при двух положениях вертикального круга теодолита (КЛ и КП)

можно применить методику наблюдений как с расчетом угла встречи светила ΔA , так и на искусственно создаваемой коллимации.

Для каждого измеренного горизонтального угла составляют уравнение поправок вида (9.39). Так как для наблюдений светил в меридиане

$$b_i = \sin A_i \operatorname{ctg} z_i = 0,$$

$$c_i = \cos A_i \operatorname{ctg} z_i = \pm \operatorname{ctg} z_i,$$

то уравнение (9.39) примет вид:

$$\Delta a' \pm \operatorname{ctg} z_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i, \quad (12.11)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

где

$$l_i = (a_0 - A_{0i}) - Q'_i, \quad A_{0i} = A'_i + \delta A_i + \Delta A_{(\text{Шк}-\text{Мх})}.$$

При наблюдениях в меридиане поправка за ускорение $\Delta A_W = 0$.

Т а б л и ц а 92

Вычисление свободных членов уравнений поправок
(для наблюдений звезд в меридиане)

Пункт *Комсомольский* $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40''$ $\lambda_0 = 3^h 16^m 35,00^s$
Направление *Комсомольский—Нагорное* $a_0 = 225^\circ 14' 10''$

Действия	Номер звезды	
	683—S	203—N
T_H	18 ^h 55 ^m 21,138 ^s	19 ^h 12 ^m 35,739 ^s
u_0	+24,852	+25,178
$\omega (T_H - X)$	+0,320	+0,055
s	18 55 46,310	19 13 00,972
$\alpha + \operatorname{put} \alpha$	18 55 40,810	7 12 50,969
t^s	+5,500	+10,003
$15 t^\circ$	82,50"	+150,04"
z	66° 07' 55"	79° 19' 13"
δ	-21 09 15	+59 42 07
$\cos \delta$	0,93261	0,50450
$\operatorname{cosec} z$	1,09352	1,03374
$\cos \delta \operatorname{cosec} z$	1,01983	0,52152
A'_{0i}	180° 01' 24,13"	0° 01' 18,25"
δA_i	-0,25	+0,23
$\frac{1}{2} (\text{Мх} - \text{Шк}) \operatorname{cosec} z$	-0,66	-0,62
Q'_i	45° 12' 46,18"	225° 12' 50,58"
a'_i	225 14 09,40	225 14 08,44
a_0	225 14 10,00	
l_i	+0,60"	+1,56"

Уравнения поправок

Дата	Номер звезды	Вес P	$a = 1$	c_i	l_i	s_i	$a \sqrt{P}$	$c \sqrt{P}$	$l \sqrt{P}$	$s \sqrt{P}$	v	
27.6.1975 г.	129 N	0,868	+1	+0,389	+5,53"	+6,919	0,932	+0,362	+5,154"	+6,448	+0,64"	
	419 S	0,882	1	-0,365	-0,34	-0,295	0,939	-0,343	-0,319	+0,277	-2,19	
	178 N	0,830	1	+0,452	+2,12	+3,572	0,911	+0,412	+1,931	+3,254	-3,03	
	683 S	0,836	1	-0,442	+0,60	+1,158	0,914	-0,404	+0,548	+1,058	-0,94	
	203 N	0,936	1	+0,262	+1,56	+2,822	0,967	+0,253	+1,510	+2,732	-2,82	
	496 S	0,713	1	-0,634	+1,28	+1,646	0,844	-0,535	+1,080	+1,389	+0,51	
	236 N	0,850	1	+0,419	+6,68	+8,099	0,922	+0,386	+6,159	+7,467	+1,67	
	525 S	0,841	1	-0,434	-0,64	-0,074	0,917	-0,398	-0,587	-0,068	-2,22	
	251a N	0,830	1	+0,453	+3,85	+5,303	0,911	+0,413	+3,507	+4,831	-1,30	
	547 S	0,637	1	-0,755	+0,45	+0,695	0,798	-0,602	+0,359	+0,555	+0,17	
	419 S	0,882	1	-0,365	+3,91	+4,545	0,939	-0,343	+3,671	+4,268	+2,06	
	30.6.1975 г.	178 N	0,830	1	+0,425	+5,21	+6,662	0,911	+0,412	+4,746	+6,069	+0,06
		451 S	0,888	1	-0,356	+1,05	+1,694	0,942	-0,335	+0,989	+1,596	-0,84
203 N		0,936	1	+0,262	+3,79	+5,052	0,968	+0,254	+3,669	+4,890	-0,59	
685 S		0,765	1	-0,554	+1,07	+1,516	0,875	-0,485	+0,936	+1,326	-0,02	
214 N		0,943	1	+0,245	+2,97	+4,215	0,971	+0,238	+2,884	+4,093	-1,34	
496 S		0,713	1	-0,634	-1,28	-0,914	0,844	-0,535	-1,080	-0,771	-2,05	
236 N		0,850	1	+0,419	+8,25	+9,669	0,922	+0,386	+7,606	+0,915	+3,24	
525 S		0,854	1	-0,413	+3,76	+4,347	0,924	-0,382	+3,474	+4,017	+2,10	
248 N		0,822	+1	+0,466	+9,78	+11,246	0,967	+0,423	+8,870	+10,200	+4,58	
254 N		0,940	1	+0,253	+3,19	+4,443	0,970	+0,245	+3,094	+4,310	-1,16	
464 S		0,585	1	-0,842	+2,40	+2,558	0,765	-0,644	+1,836	+1,957	+2,47	
436 S		0,667	1	-0,707	+2,50	+2,793	0,816	-0,577	+2,040	+2,279	+2,02	
219 N		0,940	1	+0,252	+4,87	+6,122	0,970	+0,244	+4,724	+5,938	+0,53	

Нормальные уравнения

	a]	c]	t]	s]
[Pa	+19,837	-1,063	+61,638	+80,412
[Pb		+4,156	+13,215	+16,308
[Pl			+333,658	+408,511
Контроль	-62,386	-12,465	+74,853	-74,851

Определители

$$\Delta = 82,443 - 1,130 = +81,313$$

$$\Delta_{a'} = -14,048 - 256,168 = -270,216$$

$$\Delta_y = -65,521 - 262,146 = -327,667$$

Уравненные значения неизвестных

$$\Delta a' = \frac{\Delta_{a'}}{\Delta} = -\frac{270,216}{81,313} = -3,323'' \quad y = -\frac{\Delta_y}{\Delta} = -\frac{327,667}{81,313} = -4,030''$$

Веса уравненных значений неизвестных

$$P_{a'} = \frac{\Delta}{[Pcc]} = \frac{81,313}{4,156} = 19,57 \quad P_y = \frac{\Delta}{[Paa]} = \frac{81,313}{19,837} = 4,10$$

Оценка точности

$$[Pv^2] = [PlI] + [Pal] \Delta a' + [Pcl] y = 333,658 - 204,823 - 53,256 = 75,579$$

$$\mu = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-2}} = \sqrt{\frac{75,579}{22}} = 1,85'',$$

$$m_{a'} = \frac{\mu}{\sqrt{P_{a'}}} = \frac{1,85''}{\sqrt{19,57}} = 0,42'',$$

$$m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}} = \frac{1,85''}{\sqrt{4,10}} = 0,91''$$

Вычисление значений ξ_0 и η_0

$$\xi_0 = \varphi_0 - B = 44^\circ 58' 40,00'' - 44^\circ 58' 32,520'' = +7,480'' \quad \sin B = 0,7068$$

$$\lambda_0 = 3^h 16^m 35,00^s = 49^\circ 08' 45,00'' \quad \cos B = 0,7074$$

$$L = \quad \quad \quad 49 \ 08 \ 49,40$$

$$\lambda_0 - L = \quad \quad \quad -4,40'' \quad \eta_0 = (\lambda_0 - L) \cos B = -3,113''$$

Условный азимут направления
Комсомольский—Нагорное

$$a' = a_0 + \Delta a' = 225^\circ 14' 10,00'' - 3,32'' = 225^\circ 14' 06,68''$$

$$\cos a' = -0,7042 \quad \sin a' = -0,7100$$

$$z_{\Delta} = 89^\circ 12,3' \quad \operatorname{ctg} z_{\Delta} = 0,0139$$

Геодезический азимут направления
Комсомольский—Нагорное

$$a_r = a' - (\lambda_0 - L) \sin B + (\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a') \operatorname{ctg} z_{\Delta}$$

$$a' = 225^{\circ} 14' 06,68'' \quad M_{a_r} = \sqrt{m_{a'}^2 + m_L^2 \sin^2 \varphi}$$

$$- (\lambda_0 - L) \sin B = +3,11 \quad m_{a'} = 0,42''$$

$$(\eta_0 \cos a' - \xi_0 \sin a') \operatorname{ctg} z_{\Delta} = +0,10'' \quad m_L = 0,03''$$

$$a_r = 225^{\circ} 14' 09,89''$$

$$M_{a_r} = \sqrt{(0,42)^2 + (0,015)^2} = 0,42''$$

При значениях часовых углов $|t| < 15^s$ азимут светил можно вычислять по формулам для южных звезд

$$A'_{0S} = 15t_S \cos \delta_S \operatorname{cosec} z_S \pm 180^{\circ},$$

для северных звезд в нижней кульминации

$$A'_{0N} = 15(t_N \pm 12^h) \cos \delta_N \operatorname{cosec} z_N, \quad (12.12)$$

где

$$t_{S, N} = T_{HS, N} + u_0 + \omega (T_{HS, N} - X) - (\alpha_{S, N} \pm \Delta\alpha_{\text{nut } S, N}).$$

Из решения n уравнений поправок (12.11) по методу наименьших квадратов находят уравненные значения a' и y и оценивают точность их вывода. Геодезический азимут направления вычисляют по формуле (9.50). При окончательных вычислениях азимут исправляют всеми необходимыми поправками, указанными в главе 9.

Пример непосредственного определения геодезического азимута из наблюдений звезд в меридиане приведен в табл. 91—94.

В соответствии с требованиями инструкции азимут определяют 18 приемами за период не менее трех вечеров.

Оценивая способ в целом, следует отметить, что при одиночных наблюдениях звезд в меридиане много тратится непроизводительного времени на ожидание звезд необходимой яркости. В этом отношении данный способ значительно уступает способу определения геодезического азимута из многократных наблюдений ярких звезд вблизи меридиана (см. главу 10), особенно в районах высоких широт, в период полярного дня.

§ 89. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ (ВРЕМЕНИ)
 ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ n ЗВЕЗД
 В ВЕРТИКАЛЕ МЕРИДИАННОЙ МИРЫ

Для определения долготы (времени) с максимальным весом наблюдения светил, на основании (9.66), необходимо производить в меридиане на малых зенитных расстояниях ($z < 40^\circ$), симметрично относительно зенита. При наблюдениях астрономическим теодолитом с обычного полевого астрономического столба или штатива, когда нет уверенности в сохранности азимута теодолита в течение длительного промежутка времени, наиболее целесообразно наблюдение прохождений звезд в вертикале меридианной миры. В этом случае устойчивость теодолита по азимуту требуется в течение 5—8 мин, необходимых на наблюдение одной звезды при двух положениях прибора.

Сущность данного способа состоит в измерении малого горизонтального угла Q'_i между мирой и светилом в момент его прохождения через вертикал миры.

Для каждой звезды, наблюдаемой в вертикале меридианной миры, составляется уравнение поправок вида (12.11), в котором азимут светила A'_0 вычисляется по формулам (12.12). Малый горизонтальный угол Q'_i вычисляется по формуле (12.1) без учета поправки cq за влияние коллимации, которая для наблюдений светил в меридиане пренебрегаемо мала. Из совместного решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов находят уравненные значения a' и y и оценивают точность их вывода. При наблюдениях звезд на малых z по обе стороны от зенита точность вывода азимута миры будет невысокой, а точность вывода y будет близка к максимальной. Далее, в зависимости от поставленной задачи, вычисляют значения η' , λ' или поправку хронометра u .

$$\eta = y + 15(\lambda_0 - L) \cos \varphi; \quad \lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y \sec \varphi.$$

Для вывода поправок хронометра производят уравнивание не всей совокупности наблюдений, произведенных на пункте, а коротких серий из K звезд, заключенных между приемами радиосигналов времени двух станций. Из уравнивания каждой серии звезд находят свое значение y_i , а с ними значение поправки хронометра

$$u_i = u_0 + \frac{1}{15} y_i \sec \varphi \quad \text{в момент} \quad X = \frac{X'_i + X''_i}{2}.$$

**§ 90. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ (ДОЛГОТЫ)
ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ n ЗВЕЗД В МЕРИДИАНЕ
С ПОМОЩЬЮ ПАССАЖНОГО ИНСТРУМЕНТА**

1. Сущность способа с позиций общей теории

При определениях долгот основных пунктов, а также при определениях поправок часов в обсерваториях и службах времени, где наблюдения производятся с помощью массивных пассажных инструментов с фундаментальных столбов, когда не имеется опасений в изменении азимута прибора в течение длительного промежутка времени (1—2 ч), надобность в меридианной мере отпадает. В этом случае вместо азимута направления на миру определяется азимут большого круга прибора, ориентированного в меридиане.

Выгоднейшие условия выбора звезд для определения времени (долготы) остаются, разумеется, теми же самыми, т. е. звезды в меридиане выбираются на малых зенитных расстояниях, симметрично относительно зенита.

Наблюдение прохождений каждой звезды через вертикал пассажного инструмента осуществляется «на искусственной коллимации» подвижной нити контактного микрометра, на одних и тех же оборотах винта при двух положениях горизонтальной оси прибора (окуляр W и окуляр E).

Для вывода азимута пассажного инструмента a' и величины y можно воспользоваться тем же уравнением поправок (12.11), которое применяется для наблюдений звезд астрономическим теодолитом в вертикале меридианной меры. При этом малый горизонтальный угол Q'_i между вертикалами прибора и светила в средний момент T_H наблюдений в приеме, на основании выражения (12.2), определяется формулой

$$Q'_i = - \left(\sigma_i^* \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_i + \Delta N_{\text{ц}_i} \right), \quad (12.13)$$

и является, как это видно, функцией наклона горизонтальной оси и погрешностей формы цапф.

Влияние коллимационной ошибки, как указывалось выше, исключается из результатов наблюдений при двух положениях горизонтальной оси.

Для каждого светила, наблюденного в вертикале пассажного инструмента, можно составить с учетом указанных замечаний уравнение поправок вида

$$\Delta a' \pm \operatorname{ctg} z_i y + l_i = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i, \quad (12.11')$$

где

$$l_i = a_0 - \left[A'_i + \delta A_i - b^* \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_i - \Delta N_{\text{ц}_i} + (\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} z_i \right].$$

Азимут светила A_0 , вычисляется со средним моментом наблюдений в приеме по формулам (12.12). При ориентировании большого круга пассажного инструмента в меридиане с погрешностью порядка десятка секунд дуги предварительное значение азимута прибора можно положить равным нулю, т. е. $a_0 = 0$.

Из совместного решения n уравнений поправок, составленных для n звезд, наблюдаемых в интервале между приемами радиосигналов точного времени, находят уравненные значения условного азимута a' и условной составляющей уклонения отвеса y . Нормальные уравнения и формулы для вычисления неизвестных имеют вид

$$\begin{aligned} [P] \Delta a' + [Pc] y + [Pl] &= 0; \\ [Pc] \Delta a' + [Pcc] y + [Pcl] &= 0; \\ \Delta a' &= \frac{\Delta a'}{\Delta}; \quad y = \frac{\Delta y}{\Delta}, \end{aligned}$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} [P] & [Pc] \\ [Pc] & [Pcc] \end{vmatrix}; \quad \Delta a' = - \begin{vmatrix} [Pl] & [Pc] \\ [Pcl] & [Pcc] \end{vmatrix}; \quad \Delta y = - \begin{vmatrix} [P] & [Pl] \\ [Pc] & [Pcl] \end{vmatrix}.$$

Веса уравненных значений определяемых величин вычисляют по формулам

$$\left. \begin{aligned} P_{a'} &= \frac{\Delta}{[Pcc]} = [\sin^2 z] - \frac{[\sin z \cos z]^2}{[\cos^2 z]}; \\ P_y &= \frac{\Delta}{[P]} = [\cos^2 z] - \frac{[\sin z \cos z]^2}{[\sin^2 z]}, \end{aligned} \right\} \quad (12.14)$$

в которых произведения $\sin z \cos z$ для северных звезд положительны, а для южных — отрицательны.

Далее, в зависимости от поставленной задачи, вычисляют значения η' , λ' или u' в момент $X = \frac{1}{2}(X' + X'')$.

Оценку точности в каждой серии звезд производят по известным формулам

$$\begin{aligned} \mu &= \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-2}}, \quad \text{где } [Pv^2] = [Pll] + [Pl] \Delta a' + [Pcl] y, \\ \left. \begin{aligned} m_{a'} &= \frac{\mu}{\sqrt{P_{a'}}}; \quad m_y = \frac{\mu}{\sqrt{P_y}}; \\ m_{\eta'}^2 &= m_y^2 + 15^2 m_\lambda^2 \cos^2 \varphi; \\ m_{\lambda'} &= \frac{1}{15} m_y \sec \varphi; \\ m_{u'} &= \frac{1}{15} m_y \sec \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (A) \end{aligned}$$

На основании выражений (12.14) и (A) вес уравненного значения долготы (времени) будет

$$P_{\lambda'} \approx P_{u'} = P_y \cos^2 \varphi = \cos^2 \varphi \left\{ [\cos^2 z] - \frac{[\sin z \cos z]^2}{[\sin^2 z]} \right\}. \quad (12.15)$$

Из анализа формулы веса (12.15) следует:

вес $P_{\lambda'} \approx P_{u'}$ уменьшается с увеличением широты пункта пропорционально $\cos^2 \varphi$;

для достижения максимального значения веса $P_{\lambda'} = P_{u'}$ необходимо наблюдать звезды в меридиане на малых z примерно равным числом, по обе стороны от зенита, т. е. так, чтобы

$$[\cos^2 z] = \max \text{ и } [\sin z \cos z \cos A] \approx 0.$$

В этом случае приближенное значение веса будет

$$P_{\lambda'} \approx P_{u'} = \cos^2 \varphi [\cos^2 z], \quad (12.16)$$

а приближенное значение средней квадратической погрешности определения долготы (времени)

$$m_{\lambda'} (u') = \frac{\mu \sec \varphi}{\sqrt{[\cos^2 z]}}. \quad (12.17)$$

Окончательные значения составляющей η' и долготы пункта λ' получают из наблюдений K серий звезд по формулам среднего весового. Полученные значения η' и λ' исправляют необходимыми редукциями, перечисленными в главе 9.

2. Обработка наблюдений классическим способом

В практике вычислений поправки часов из наблюдений звезд в меридиане обычно пользуются не общим уравнением азимутальных способов, которое для меридиана имеет вид (12.11), а уравнением иного вида, называемым уравнением пассажиного инструмента. Вывод этого уравнения основан на теории инструментальных поправок и редукций наблюдений к плоскости меридиана.

Обычный путь вывода уравнения пассажного инструмента, ориентированного в меридиане, основан на редукционных формулах Майера—Бесселя и приводится во всех курсах практической астрономии. Мы отойдем от этого традиционного пути и покажем, что уравнение Майера—Бесселя является всего лишь частным случаем общего уравнения азимутальных способов, составленного для наблюдений звезд в меридиане и имеющего вид

$$\begin{aligned} \Delta a' + \operatorname{ctg} z_i \cos A_i y + \left[a_0 - (A'_i + \delta A_i) + \right. \\ \left. + (\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} z_i - b_i \operatorname{ctg} z_i - \Delta N_{u_i} \right] = \\ = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_i. \end{aligned} \quad (12.11'')$$

В уравнении (12.11") условный азимут a' большого круга прибора и условную составляющую уклонения отвеса y можно представить в виде

$$a' = a_0 + \Delta a' = a^s - (\lambda - \lambda_0)^s \sin \varphi = a^s - \Delta u \sin \varphi;$$

$$y^s = \Delta \lambda^s \cos \varphi = \Delta u \cos \varphi,$$

где a^s — астрономический азимут пассажного инструмента, выраженный в часовой мере углов. С указанными значениями a' и y уравнение (12.11") примет вид

$$a^s - (\sin \varphi - \cos \varphi \cos A_i \operatorname{ctg} z_i) \Delta u + \left[- (A'_{0_i} + \delta A_i^s) + \right. \\ \left. + (\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R^s}{2} \operatorname{cosec} z_i - b^s \operatorname{ctg} z_i - \Delta N_{u_i} \right] = v_i$$

$$P_i = \sin^2 z_i^*.$$

Так как

$$(\sin \varphi - \cos \varphi \cos A_i \operatorname{ctg} z_i) = \frac{\cos \delta \cos q_i}{\sin z_i},$$

где для меридиана $\cos q = \pm 1$,

$$A'_{0_i} = \frac{t_0 \cos \delta_i}{\sin z_i} \text{ — при счете азимута от точки Юга,}$$

$$\delta A_i = \pm \frac{0,021^s \cos \varphi_0}{\sin z_i}, \text{ то}$$

$$-a^s + \frac{\cos \delta_i}{\sin z_i} \Delta u + \left[\frac{t_0 \cos \delta_i}{\sin z_i} + \frac{0,021^s \cos \varphi}{\sin z_i} + \right. \\ \left. + (\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R^s}{2} \operatorname{cosec} z_i - b_i^s \operatorname{ctg} z_i - \Delta N_{u_i} \right] = v_i$$

с весом $P_i = \sin^2 z_i$.

Учитывая, что в теории пассажного инструмента азимут a считается положительным, когда «в южной части сферы большой круг уклоняется к востоку от меридиана», а наклон горизонтальной оси

$$b^s = \frac{(\text{Л} + \text{П})_0 - {}_0(\text{Л} + \text{П})}{2} \cdot \frac{\tau''}{2 \cdot 15} = - \frac{{}_0(\text{Л} + \text{П}) - (\text{Л} + \text{П})_0}{2} \cdot \frac{\tau^s}{2},$$

получим

$$a^s + \frac{\cos \delta_i}{\sin z_i} \Delta u + \left[\frac{t_0 \cos \delta_i}{\sin z_i} \pm \frac{0,021^s \cos \varphi}{\sin z_i} + \right. \\ \left. + (\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R^s}{2} \operatorname{cosec} z_i + b_i^s \operatorname{ctg} z_i - \Delta N_{u_i} \sin z_i \right] = v'_i$$

с весом $P_i = \sin^2 z_i$.

(12.18)

Приведя уравнение (12.18) к весу $P_i = 1$, будем иметь

$$a^s \sin z_i + \Delta u \cos \delta_i + \left[t_{0_i} \cos \delta_i \pm 0,021^s \cos \varphi + (\text{Шк} - Mx) \frac{R}{2} + b_i^s \cos z_i - \Delta N_{u_i} \sin z_i \right] = v'_i \text{ с весом } P_i = 1. \quad (12.19)$$

Если уравнение (12.19) привести к весу $P_i = \cos^2 \delta_i$, то и получим общеизвестный вид уравнения пассажного инструмента, ориентированного в меридиане:

$$\Delta u + a^s \sin z_i \sec \delta_i + \left[T_{H_i} + u_0 + \omega (T_{H_i} - X) - (\alpha_i + \delta \alpha_i) + (\text{Шк} - Mx) \frac{R}{2} \sec \delta_i + b_i^s \cos z_i \sec \delta_i - \Delta N_{u_i} \sin z_i \sec \delta_i \right] = v_i \text{ с весом } P_i = \cos^2 \delta_i. \quad (12.20)$$

С бесселевыми обозначениями коэффициентов уравнение пассажного инструмента будет

$$\Delta u + A_i a + [t_{0_i} + B_i b_i - A_i \Delta N_{u_i}] = v_i \text{ с весом } P_i = \cos^2 \delta_i \quad (12.21)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где

$$t_{0_i} = T_{H_i} + u_0 + \omega (T_{H_i} - X) + (\text{Шк} - Mx) \frac{R}{2} \sec \delta_i - (\alpha_i + \delta \alpha_i + \text{nut}_{\alpha_i});$$

$$\sin z_i \sec \delta_i = A_i, \quad \cos z_i \sec \delta_i = B_i;$$

$$\delta \alpha_i = \pm 0,021^s \cos \varphi \sec \delta_i.$$

Из решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов находят вероятнейшие значения u и a и оценивают точность их вывода. Численные значения неизвестных, полученные из решения нормальных уравнений, будут

$$\Delta u = \frac{\Delta u}{\Delta}; \quad a = \frac{\Delta a}{\Delta}; \quad u = u_0 + \Delta u \text{ в момент } X, \quad (12.22)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} [P][PA] \\ [PA][PAA] \end{vmatrix}; \quad \Delta u = - \begin{vmatrix} [Pl][PA] \\ [PAI][PAA] \end{vmatrix};$$

$$\Delta a = - \begin{vmatrix} [P][Pl] \\ [PA][PAI] \end{vmatrix}.$$

Весы уравненных значений u и a находят из формул

$$\left. \begin{aligned} P_u &= \frac{\Delta}{[PAA]} = [P] - \frac{[PA^2]}{[PAA]} = [\cos^2 \delta] - \frac{[\sin z \cos \delta]^2}{[\sin^2 z]}; \\ P_a &= \frac{\Delta}{[P]} = [PAA] - \frac{[PA^2]}{[P]} = [\sin^2 z] - \frac{[\sin z \cos \delta]^2}{[\cos^2 \delta]}. \end{aligned} \right\} \quad (12.23)$$

Оценку точности уравненных величин производят по формулам

$$\mu = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{n-2}}; \quad m_u = \mu \sqrt{\frac{1}{P_u}}; \quad m_a = \mu \sqrt{\frac{1}{P_a}}. \quad (12.24)$$

Очевидно, что формулы (12.23) и (12.15) должны дать одинаковые численные значения веса P_u . Однако для анализа выгоднейших условий наблюдений и практического пользования формула (12.15), вытекающая из общей теории азимутальных способов, имеет несомненные преимущества перед формулой (12.23). Действительно, выражение (12.23) не дает прямого ответа для установления выгоднейших условий наблюдений, в то время как формула (12.15) вполне однозначно определяет условия выбора звезд, при которых $P_u = \max$, а именно: для определения времени (долготы) с максимальной точностью необходимо производить наблюдения звезд в меридиане на малых зенитных расстояниях ($z < 40^\circ$), примерно равным числом по обе стороны от зенита, т. е. так, чтобы

$$[\cos^2 z] = \max \text{ и } [\sin z \cos z \cos A] = 0.$$

Если для каких-либо целей требуется уточнить азимут пассажного инструмента, то необходимо дополнительно выполнить наблюдения северных и южных звезд на больших z ($z > 50^\circ$). Следует иметь в виду, что точность определения времени при этом существенно не изменится.

§ 91. ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДОЛГОТ ОСНОВНЫХ ПУНКТОВ

При определениях долгот основных пунктов поправку часов рекомендуется определять из наблюдений звезд в меридиане с помощью пассажного инструмента (диаметр отверстия объектива 100 мм). Для определения долготы основного пункта выполняется обширная программа наблюдений как на определяемом, так и на фундаментальном пунктах, как правило, двумя наблюдателями и двумя приборами. Общее число независимых определений долгот достигает 160—180. Средняя квадратическая погрешность определения долготы основного пункта не должна превышать $0,005^s$.

При условии определения лично-инструментальной разности на фундаментальном пункте определение долготы основного пункта сводится, по существу, к нахождению разности долгот определяемого и фундаментального пунктов.

Действительно, лично-инструментальная разность на фундаментальном пункте определяется как разность исходной и определяемой долготы пункта

$$\partial\lambda = \lambda_\phi - \lambda'_\phi.$$

Долгота основного пункта с учетом поправки за лично-инструментальную разность определяется по формуле

$$\lambda_0 = \lambda'_0 + \partial\lambda = \lambda'_0 + (\lambda_\phi - \lambda'_\phi) = \lambda_\phi + (\lambda'_0 - \lambda'_\phi).$$

Следовательно, для определения долготы основного пункта фактически необходимо определить разность

$$\Delta\lambda = \lambda'_0 - \lambda'_f.$$

В разности долгот исключаются все постоянные погрешности, входящие в эти долготы, в том числе и постоянная часть лично-инструментальной погрешности.

В настоящее время применяются как двухсторонние определения долгот основного и фундаментального пунктов двумя наблюдателями и двумя приборами, так и односторонние.

При двухсторонних определениях оба наблюдателя выполняют одновременно наблюдения один — на первом, а другой — на втором пунктах с последующей переменной мест наблюдения.

Такая программа наблюдений позволяет в разности исключить систематические погрешности эталонных моментов всемирного времени, чего нельзя, вообще говоря, достичь при выполнении односторонних определений. Влияние систематических погрешностей координат звезд можно ослабить, выполняя наблюдения звезд на том и другом пунктах примерно в одной зоне неба по склонению.

Для полного исключения погрешностей координат звезд следует на обоих пунктах наблюдать одни и те же звезды. Влияние личных погрешностей наблюдателя в настоящее время исключается применением фотоэлектрического метода регистрации звездных прохождений. Однако инструментальная составляющая лично-инструментальной разности, зависящая от конструктивных особенностей и качества основных узлов каждого прибора, все еще представляет собой сложную проблему для дальнейшего повышения точности определения долгот основных пунктов. Если постоянная часть этой погрешности исключается в разности долгот, определенной одним и тем же прибором, то переменная ее часть, изменяющаяся со временем, иногда в значительных пределах, составляет основные погрешности в определениях поправок часов.

В смысле осуществления постоянного контроля за поведением инструментальных погрешностей двойные односторонние определения долгот основных пунктов оказываются более предпочтительными, чем двухсторонние. Общая организация работ при двойных односторонних определениях долгот основных пунктов значительно проще, чем при двухсторонних определениях, особенно когда основной и фундаментальный пункты удалены друг от друга на большие расстояния.

Ошибки бюллетеней всемирного времени при современной организации и техническом оснащении служб времени оказывают безусловно меньшее влияние на точность определения долгот при двойных односторонних определениях, чем остаточное влияние инструментальных погрешностей, неучитываемое при двухсторонних определениях.

Наблюдения	Наблюдатель	Пункт	Число вечеров наблюдений	Наблюдатель	Пункт	Число вечеров наблюдений
Лично-инструментальная разность	А	I	5	Б	I	5
Первая разность долгот	А	I	10	Б	II	10
Лично-инструментальная разность	А	II	10	Б	II	10
Вторая разность долгот	А	II	10	Б	I	10
Лично-инструментальная разность	А	I	5	Б	I	5

Т а б л и ц а 96

Наблюдения	Наблюдатели	Пункт	Число вечеров наблюдений
Лично-инструментальная разность	А и Б	I	10+10
Первая разность долгот	А и Б	II	10+10
Вторая разность долгот	А и Б	II	10+10
Лично-инструментальная разность	А и Б	I	10+10

Впрочем, эти вопросы требуют дальнейших фундаментальных исследований.

Программа двусторонних определений разности долгот основных пунктов двумя наблюдателями и двумя приборами была разработана в сороковых годах известными астрономами П. Н. Долговым и М. С. Зверевым. Эта программа схематически приведена в табл. 95.

Программа, как это видно из табл. 95, предусматривает определение двух независимых разностей долгот и совместные определения лично-инструментальных разностей наблюдателей на фундаментальном и основном пунктах.

Таким образом, каждый наблюдатель выполняет наблюдения в течение 40 вечеров, причем продолжительность наблюдений в каждый вечер не менее 4 ч. Всего программой предусматривается определение 160 долгот. Чтобы ослабить влияние сезонных погрешностей, продолжительность наблюдений на каждом пункте должна быть не менее 1,5—2 месяцев. Вечера наблюдений обоих наблюдателей могут и не совпадать. Программа двойных односторонних определений представлена в табл. 96.

§ 92. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ПАР ЗВЕЗД В ВЕРТИКАЛЕ МЕРИДИАННОЙ МИРЫ

Выше был рассмотрен способ определения долготы (времени) из независимых наблюдений n звезд в вертикале меридианной миры с помощью астрономического теодолита. Для совместного

определения a' и y достаточно, вообще говоря, выполнить подобные наблюдения двух звезд в вертикале меридианной миры: одной — к югу, другой — к северу от зенита, на малых зенитных расстояниях.

Из решения двух уравнений (12.11), составленных для каждой пары звезд, получим

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{\Delta y}{\Delta} = \frac{\sin z_S \sin z_N}{\sin(z_S + z_N)} (l_S - l_N); \\ \Delta a' &= \frac{\Delta a'}{\Delta} = \frac{l_N \sin z_N \cos z_S + l_S \sin z_S \cos z_N}{\sin(z_S + z_N)}. \end{aligned} \right\} \quad (12.25)$$

Веса уравненных величин для каждой пары звезд определяются выражениями (12.14).

Уравненное значение составляющей y из наблюдений n пар звезд будет

$$y_{\text{ср}} = \frac{\sum y_i \cdot P_{y_i}}{[P_{y_i}]} \text{ с весом } P_{y_{\text{ср}}} = [P_{y_i}]. \quad (12.26)$$

Среднюю квадратическую погрешность, подсчитанную по отклонениям отдельных значений y_i от среднего весового, вычисляют по формуле

$$m_y = \sqrt{\frac{[P_{y_i} v_y^2]}{(n-1)[P_{y_i}]}}. \quad (12.27)$$

Долготу пункта и составляющую η' вычисляют по известным формулам

$$\left. \begin{aligned} \lambda' &= \lambda_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi \text{ с весом } P_{\lambda'} = P_{y_{\text{ср}}} \cos^2 \varphi; \\ \eta' &= y_{\text{ср}} + 15(\lambda_0 - L)^s \cos \varphi \text{ с весом } P_{\eta'} = P_{y_{\text{ср}}}; \\ m_{\lambda'} &= \frac{1}{15} m_y \sec \varphi, \quad m_{\eta'} = \sqrt{m_{y_{\text{ср}}}^2 + 15^2 m_L^2 \cos^2 \varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (12.28)$$

Для определения поправок хронометра вычисляют значение $y_{\text{ср}}$ из наблюдений коротких серий, состоящих из K пар звезд, замкнутых приемами радиосигналов времени. Формулы для вычислений имеют вид

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi \text{ в момент } X, \quad m_{y_{\text{ср}}} = \sqrt{\frac{[P_{y_i} v_y^2]}{(K-1)[P_{y_i}]}}; \\ m_u &= \frac{1}{15} m_{y_{\text{ср}}} \sec \varphi \text{ с весом } P_u' = P_{y_{\text{ср}}} \cos^2 \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (12.29)$$

**§ 93. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОТЫ ПО РАЗНОСТИ
ИЗМЕРЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ
ПАР ЗВЕЗД В МЕРИДИАНЕ**

В данном способе вместо наблюдений прохождений звезд в вертикале меридианной миры измеряют горизонтальные направления на светила в моменты их кульминаций. В целях сокращения промежутка времени, необходимого для неизменного положения теодолита по азимуту, звезды группируют попарно. Чтобы определить долготу (время) с максимальным весом, звезды в каждой паре на основании (9.66') необходимо выбирать по разные стороны от зенита, на малых ($z < 40^\circ$) и близких между собой ($|z_N - z_S| < 10^\circ$) зенитных расстояниях.

Для современных прецизионных теодолитов погрешность многократного визирования на миру с помощью подвижной нити контактного микрометра примерно равна случайной погрешности отсчета по горизонтальному лимбу. Поэтому, полагая что влияние всех других источников погрешностей в обоих способах одинаково, можно считать, что определения долготы (времени) из наблюдений звезд в вертикале меридианной миры и данным способом по точности будут примерно равноценны. Измерение горизонтального направления на каждую звезду производят при двух положениях теодолита (КЛ и КП). При этом возможны две равноценные методики наблюдений:

на искусственной большой коллимации подвижной нити контактного микрометра;

с расчетом углов встречи ΔA , симметричных относительно меридиана.

Наблюдения пар звезд в каждый вечер периодически, не реже чем через два часа, замыкаются приемом радиосигналов времени.

Для измеренных горизонтальных направлений каждой пары звезд, на основании (9.40), имеют два уравнения поправок вида

$$\left. \begin{aligned} \Delta M'_N - \operatorname{ctg} z_N y + l_N = v_N \text{ с весом } P_N = \sin^2 z_N; \\ \Delta M'_S + \operatorname{ctg} z_S y + l_S = v_S \text{ с весом } P_S = \sin^2 z_S, \end{aligned} \right\} \quad (12.30)$$

где

$$l_{N, S} = A'_{0N, S} + \delta A_{N, S} + \Delta A_{(\text{шк}+\text{мх})N, S} + M'_N - N'_{N, S}.$$

Азимуты $A'_{0N, S}$ и часовые углы $t'_{0N, S}$ вычисляют по формулам (12.12). Из решения уравнений (12.30), при отсутствии избыточных измерений, получим

$$\left. \begin{aligned} y = \frac{\Delta y}{\Delta} = \frac{\sin z_N \sin z_S}{\sin(z_N + z_S)} [(A_{0N} - A_{0S}) - (N'_N - N'_S)]; \\ \Delta M'_N = \frac{\Delta \Delta M_N}{\Delta}, \end{aligned} \right\} \quad (12.31)$$

где

$$A_{0N, S} = A'_{0N, S} + \delta A_{N, S} + \Delta A_{(\text{шк}-\text{мх})N, S}.$$

Формулу (12.31) для вычисления y можно также представить в виде

$$y = \frac{(A_{0N} - A_{0S}) - (N'_N - N'_S)}{\operatorname{ctg} z_N + \operatorname{ctg} z_S}. \quad (12.31')$$

Весы полученных значений неизвестных, при близких зенитных расстояниях звезд пары, определяются формулами

$$P_y = [\cos^2 z]; \quad P_{M_N} = [\sin^2 z].$$

Уравненное значение $y_{\text{ср}}$ из наблюдений n пар звезд и его средняя квадратическая погрешность вычисляются по формулам (12.26) и (12.27).

Вычисление уравненных значений λ' , η и u и оценку их точности производят по формулам (12.28) и (12.29). Из формулы (12.31) следует, что в разности $(N'_N - N'_S)$ будет исключено влияние систематических и случайных погрешностей диаметров лимба, которые для данного способа являются общими для обоих измеряемых направлений. Если звезды в парах имеют близкие зенитные расстояния, то в разности измеренных направлений практически исключается влияние погрешностей цапф, бокового гнуптия трубы, систематических погрешностей в определении наклона горизонтальной оси и других систематических погрешностей, действующих на результаты измерений в функции зенитных расстояний светил.

Поэтому рассматриваемый способ, как и способ определения долготы по наблюдениям пар звезд в вертикале меридианной миры, принципиально должен давать высокие по точности результаты.

§ 94. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ ХРОНОМЕТРА И ДОЛГОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ПРОХОЖДЕНИЙ ЮЖНЫХ ЗВЕЗД В ВЕРТИКАЛЕ ПОЛЯРНОЙ (способ Деллена)

В этом способе, разработанном пулковским астрономом Делленом в 1864 г., вертикалом, служащим для наблюдений прохождения южных звезд, является переменный вертикал, соответствующий вертикалу Полярной в средний момент ее наблюдения. Азимут Полярной для широт до 75° не превышает $3,5^\circ$, вследствие чего этот переменный вертикал всегда близок к меридиану. Наблюдения Полярной служат для определения азимута вертикала прибора, в плоскости которого наблюдается прохождение южной звезды.

Из наблюдений южной звезды с известным азимутом прибора выводится значение поправки хронометра. Наблюдение каждой пары звезд занимает 8—10 мин, в течение которых можно не опасаться азимутальных сдвигов прибора. Способ основан на наблюдениях ярких звезд, что обеспечивает его успешное применение в высоких широтах в период полярного дня. В настоящее время способ Деллена рекомендуется инструкцией в качестве основного

способа для определения времени и долгот пунктов в широтах, превышающих 65° . Сам Деллен разрабатывал этот способ для наблюдений с переносным пассажным инструментом. Методика наблюдений астрономическим теодолитом с контактным микрометром разработана в ЦНИИГАиК А. П. Колупаевым.

Известная методика изложения теории способа Деллена неоправданно сложна.

С позиций общей теории основы этого простого способа базируются на следующих положениях.

Сущность способа состоит в измерении малого горизонтального угла Q' между плоскостями вертикалов Полярной и южной звезды в средние моменты их наблюдений T_N и T_S .

Так же как и при наблюдениях звезд в вертикале местного предмета, который в данном способе заменяет Полярная звезда, измерение малого горизонтального угла Q' может быть произведено без отсчетов горизонтального лимба теодолита. На основании формулы (12.1) малый горизонтальный угол Q' между плоскостями вертикалов Полярной и южной звезды может быть найден из выражения

$$Q' = [(M_L - 10)_{N'}^{06} \operatorname{cosec} z_{L_N} - (M_R - 10)^{06} \operatorname{cosec} z_{R, N}] \frac{R}{2} + b_N \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_N + cq_N + \Delta N_{ц_N} - \left(b_S \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_S + cq_S + \Delta N_{ц_S} \right) \quad (12.32)$$

или

$$Q' = \Delta M + \Delta b_N + cq_N - \Delta b_S + \Delta Q_{ц},$$

где

$$\Delta M = [(M_L - 10)_{N'}^{06} \operatorname{cosec} z_{L_N} - (M_R - 10)^{06} \operatorname{cosec} z_{R, N}] \frac{R}{2};$$

$$\Delta b_N = b_N \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_N;$$

$$\Delta b_S = b_S \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_S; \quad cq_S = 0; \quad \Delta Q_{ц} = \Delta N_{ц_N} - \Delta N_{ц_S}.$$

Считая Полярную обычной северной звездой, для каждой пары, составленной из Полярной и южной звезд, будем иметь два уравнения вида (12.30). Решение этих уравнений может быть осуществлено как методом приближений, так и обычным путем. В последнем случае значение y из наблюдений каждой пары звезд может быть вычислено по формуле (12.31) или (12.31'), т. е.

$$y = \frac{\sin z_N \sin z_S}{\sin(z_N + z_S)} [(A_{0_N} - A_{0_S}) - (N'_N - N'_S)]$$

или

$$y = \frac{(A_{0_N} - A_{0_S}) - (N'_N - N'_S)}{\operatorname{ctg} z_N + \operatorname{ctg} z_S} \text{ с весом } P_y \approx [\cos^2 z].$$

Пример определения поправки часов и долготы пункта способом Деллена

Ж у р н а л н а б л ю д е н и й

Пара № 6. Дата 26/27.6.1954 г.
 $\varphi = 55^{\circ} 45' 39''$, $\lambda = 2^{\text{h}}30^{\text{m}}39,479^{\text{s}}$
 $R = 114,59''$ $\tau = 2,118''$

Наблюдатель *А. П. Колупаев*
 Теодолит АУ 2"/10" $c = -5,0''$
 $(\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2} = -0,6585''$, $c_0 = +15,00^{\text{s}}$

В момент $T = 21^{\text{h}}14,0^{\text{m}}$ Данных о погрешностях формы цапф нет ($\Delta Q_{\text{ц}} = 0$).

Полярная ($\alpha V \text{mi}$)
 $\lambda + \alpha_N = 4^{\text{h}}22^{\text{m}}$ $\alpha_N = 1^{\text{h}}52^{\text{m}}04,01^{\text{s}}$
 $s - (\lambda - \alpha) = 16^{\text{h}}52^{\text{m}}$ $\delta_N = 89^{\circ} 02' 52,13''$ $s = T_{HN} + u_0 = 21^{\text{h}}14^{\text{m}}46,80^{\text{s}}$
 $n = 0,703$

КЛ			КП		
Уровень (Л + П)			Уровень (Л + П)		
9,6—26,0	35,6	$z_L = 33^{\circ} 55,4'$	13,9—30,2	44,1	$z_R = 33^{\circ} 53,4'$
26,0—9,8	35,8	$\text{ctg } z_L = 1,4868$	23,0—6,6	29,6	$\text{ctg } z_R = 1,4887$
		$\text{cosec } z_L = 1,7918$			$\text{cosec } z_R = 1,7934$
$b^{\delta/2} = -0,10$		$b \frac{\tau}{2} = -1,106''$	$b^{\delta/2} = +7,25$		$b \frac{\tau}{2} = +7,678''$
$x = -0,70$			$x = -1,85$		
$b \frac{\tau}{2} \text{ctg } z_L = -0,16''$			$\Delta b_{N\text{ср}} = +5,64''$		$b \frac{\tau}{2} \text{ctg } z_R = +11,43''$
					$q_N = -0,0008$
№ наведений	Микрометр	Хронометр T_{NL}	№ наведений	Микрометр	Хронометр T_{NR}
1	13 ⁰⁶ ,990	21 ^h 09 ^m 45,4 ^s	1	14 ⁰⁶ ,159	21 ^h 18 ^m 35,2 ^s
2	977	59,3	2	162	51,1
3	960	13,6	3	182	19 04,0
4	957	25,2	4	200	20,6

<p>Среднее $M_L = 13,9710 \quad 21^{\text{h}}10^{\text{m}}05,88^{\text{s}}$ $(M_L - 10^{06}) \operatorname{cosec} z_L = +7,1152$ $T_{HN} = \frac{1}{2} (T_{NL} + T_{NR}) = 21^{\text{h}}14^{\text{m}}31,80^{\text{s}}$ $\Delta T_N = (T_H - T_L)_N = 265,9^{\text{s}}$</p>		<p>Среднее $M_R = 14,1758 \quad 21^{\text{h}}18^{\text{m}}57,72^{\text{s}}$ $-(M_R - 10^{06}) \operatorname{cosec} z_R = -7,4889$ $\Delta M^{06} = -0^{06},3737$ $\Delta M'' = \frac{1}{2} R \Delta M^{06} = -21,41''$</p>	
Южная № 517—S		Вычисление угла	
<p>КП $9,8-26,2 \quad 36,0$ $25,8-9,3 \quad 35,1$ $b^{\partial/2} = +0,45$</p>	<p>КЛ $6,0-22,2 \quad 28,2$ $30,0-13,6 \quad 43,6$ $b^{\partial/2} = -7,70$</p>	<p>$z_S = 25^{\circ} 43,6'$ $\operatorname{ctg} z_S = 2,0756$ $\frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_S = 2,1981$ $b_{\text{сп}}^{\partial/2} = -3,625$ $\Delta b_S = -7,97''$</p>	<p>$Q' = \Delta M + \Delta b_N + cq_N - \Delta b_S$ $\Delta M = -21,41''$ $\Delta b_N = +5,64$ $cq_N = 00,00$ $-\Delta b_S = +7,79$ <hr/> $Q' = -7,80''$</p>
№ контакта	T_{SR}	T_{SL}	T_{Hi}
1	$21^{\text{h}}12^{\text{m}}21,81^{\text{s}}$	$21^{\text{h}}15^{\text{m}}38,26^{\text{s}}$	$21^{\text{h}}14^{\text{m}}00,00^{\text{s}}$
2	23,61	36,58	0,10
3	25,50	34,82	0,16
4	27,35	32,83	0,09
5	29,10	31,09	0,10
6	31,73	28,34	0,04
7	33,65	26,64	0,14
8	35 37	24,94	0,16
9	37,09	23,23	0,16
10	39,87	21,52	0,20
Среднее	$21^{\text{h}}12^{\text{m}}30,408^{\text{s}}$	$21^{\text{h}}15^{\text{m}}29,825^{\text{s}}$	$21^{\text{h}}14^{\text{m}}00,119^{\text{s}}$
	$\alpha_S = 21^{\text{h}}11^{\text{m}}02,330^{\text{s}}$	$\Delta T_S = T_H - T_{SR} = 89,7^{\text{s}}$	
	$\delta_S = 30^{\circ} 02' 27,81''$		

Вычисление азимутов Полярной и южной звезд
Пара № 6, 26/27.6.1954 г.

Номер действия	Обозначения	α Umi, N	517—S
1	$T_H + U_0$	$21^{\text{h}}14^{\text{m}}46,80^{\text{s}}$	$21^{\text{h}}14^{\text{m}}15,119^{\text{s}}$
2	α	1 52 04,01	21 11 02,330
4	t_0^{h}	19 22 42,79	0 03 12,789
5	t_0°	$290^{\circ} 40' 41,85''$	$0^{\circ} 48' 11,83''$
6	$\sin t_0$	-0,935578	0,014020
7	$\cos t_0$	0,353120	0,999902
15	$m \sin t_0$	-0,0276375	0,0430877
16	$n \cos t_0 - 1$	-0,9913764	1,540437
17	$\operatorname{tg} A'$	0,0278779	0,0279711
18	A'	$+1^{\circ} 35' 48,78''$	$181^{\circ} 36' 07,92''$
24	ΔA_W	-1,09	+0,24
26	δA	+0,32	-0,41
27	$(\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} z$		+1,52
28	A'_0	$+1^{\circ} 35' 48,01''$	$181^{\circ} 36' 09,27''$
8	φ	$55^{\circ} 45' 39''$	
3	δ	$89^{\circ} 02' 52,13''$	$30^{\circ} 02' 27,81''$
13	m	0,0295406	3,0732997
9	$\sec \varphi$	1,777308	1,777308
12	$\operatorname{ctg} \delta$	0,016621	1,729188
10	$\operatorname{tg} \varphi$	1,469294	1,469294
14	n	0,0244211	2,5406856
19	$\sin A'$	0,0278	-0,0279
21	k_1	0,694	0,950
20	$\sin 2A'$	0,0558	-0,0558
22	k_2	0,850	1,470
23	$W = k_1 \sin A' - k_2 \sin 2A'$	-0,0283	+0,0554
24	$\Delta A_W = 5,454W \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2$	-1,09"	+0,24"
11	$\cos \varphi$	0,563	0,563
25	$\operatorname{cosec} \delta$	1,793	2,304
26	δA	+0,32"	-0,41"

**Вычисление y_i и поправки часов u_i
по общим формулам азимутальных способов**

Номер действия	Действия	Вычисления	Номер действия	Действия	Вычисления
1	$A_N \pm 180^\circ$	$181^\circ 35' 48,01''$	7	$\text{ctg } z_N + \text{ctg } z_S$	3,5635
2	A_S	181 36 09,27	8	y_i	-8,155"
3	Q'	-7,80	9	$P_{y_i} = [\cos^2 z]$	1,50
4	$(A_N \pm 180^\circ - A_S) + Q'$	-29,06	10	$\Delta u_i =$ $= \frac{1}{15} y \sec \varphi$	-0,966 ^s
5	$\text{ctg } z_S$	2,0757	11	$u_i = u_0 + \Delta u$	+14,034 ^s в момент
6	$\text{ctg } z_N$	1,4878	12	$P_{u_i} =$ $= P_{y_i} \cos^2 \varphi$	$T_H = 21^h 14,0^m$ 0,48

Для измеренного малого горизонтального угла Q'_i можно положить

$$Q'_i + 180^\circ = (N'_S - N'_N)_i,$$

тогда

$$y_i = \frac{(A_{0N_i} + 180^\circ - A_{0S_i}) + Q'_i}{\text{ctg } z_{N_i} + \text{ctg } z_{S_i}} \text{ с весом } P_{y_i} \approx [\cos^2 z_i]. \quad (12.33)$$

Уравненное значение $y_{\text{ср}}$ из наблюдений n пар звезд получают как среднее весовое по формуле (12.26).

Поправка часов и долготы пункта вычисляются по формулам

$$\left. \begin{aligned} u &= u_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi \text{ в момент } X \text{ с весом } P_u = P_{y_{\text{ср}}} \cos^2 \varphi; \\ \lambda' &= \lambda_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi \text{ с весом } P_{\lambda'} = P_{y_{\text{ср}}} \cos^2 \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (12.34)$$

Оценка точности производится по известным формулам теории погрешностей (12.27)—(12.29).

Пример определения поправки хронометра по способу Деллена с вычислениями по формулам общей теории дан в табл. 97—99.

Журнал наблюдений в указанном примере заимствован из работы [32], в которой приведен пример вычислений по методике ЦНИИГАиК.

**§ 95. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ (ДОЛГОТЫ)
ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЮЖНЫХ ЗВЕЗД
В ВЕРТИКАЛАХ СЕВЕРНЫХ ЗВЕЗД**

В 1880 г. военный геодезист Д. Д. Геденов разработал способ определения поправки часов из наблюдений пар звезд в меридиане без применения меридианной миры и без отсчетов горизонтального круга.

В этом способе наблюдение северной и южной звезд каждой пары производится при неизменной по азимуту установке прибора, причем каждая звезда наблюдается только при одном положении вертикального круга. В этом случае в уравнениях поправок появляется дополнительное неизвестное — коллимационная ошибка c и, кроме того, каждая пара звезд имеет свое значение азимута прибора a , отличное от азимутов других пар. Для совместного определения u , c , a_1 и a_2 необходимо выполнить наблюдения двух пар (четверки) звезд при двух положениях горизонтальной оси прибора — окуляра E и окуляра W . Оценивая способ Геденова, следует отметить, что:

подбор звезд четверками часто приводит к непроизводительным затратам времени на их ожидание;

подобрать четверки звезд из ярких составляющих в течение ограниченного промежутка времени довольно трудно;

необходимость введения в уравнения поправок дополнительных неизвестных приводит к снижению точности определения времени;

наблюдение каждой звезды только при одном положении прибора приводит к возрастанию влияния некоторых систематических инструментальных погрешностей, не исключаемых данной методикой наблюдений.

Вследствие указанных недостатков способ Геденова не нашел широкого практического применения.

Недостатки способа Геденова можно устранить, если наблюдение каждой звезды, составляющей пару, производить при двух положениях теодолита (КЛ и КП). Применение такой методики оказывается возможным, если наблюдение южной звезды каждой пары производить в вертикале северной звезды, вблизи ее нижней кульминации. Примерная схема наблюдений пары звезд показана на рис. 91 и выглядит следующим образом:

наблюдение моментов прохождений северной звезды в положении I_N и КЛ;
перевод трубы через зенит, наблюдение прохождений звезды в положении I_S КП;

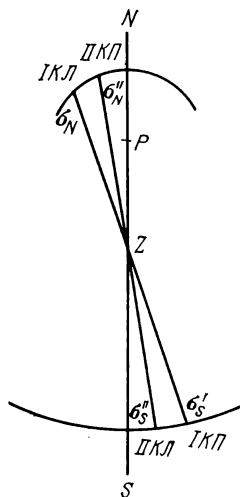


РИС. 91

наблюдение прохождений южной звезды в положении II_S КЛ; перевод трубы через зенит, наблюдение прохождений северной звезды в положении II_N КП.

В каждом положении теодолита определяется наклон горизонтальной оси по отсчетам уровня. Уровень при наблюдениях звезд пары можно не перекладывать.

Возможность применения указанной методики наблюдений основана на разности скоростей видимого движения северной и южной звезд по их суточным параллелям, вследствие чего промежуток $T_{II_S} - T_{I_S}$ оказывается существенно меньше промежутка $T_{II_N} - T_{I_N}$.

Средние моменты наблюдений северной $T_N = \frac{T_{NL} + T_{NR}}{2}$ и южной $T_S = \frac{T_{SR} + T_{SL}}{2}$ звезд вблизи меридиана будут отнесены к плоскости одного и того же вертикала. Значение y_i для каждой пары звезд может быть вычислено по формуле (12.33)

$$y_i = \frac{(A_{0N_i} + 180^\circ - A_{0S_i}) + Q'_i}{\operatorname{ctg} z_{N_i} + \operatorname{ctg} z_{S_i}} \text{ с весом } P_{y_i} \approx [\cos^2 z_i]^1,$$

в которой

$$Q'_i = \left(b_N \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_N - b_S \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_S \right) + (\Delta N_{\text{ц}_N} - \Delta N_{\text{ц}_S}); \quad (12.35)$$

азимуты звезд вычисляются со средними моментами наблюдений T_N и T_S .

Вычисление урвненных значений $y_{\text{ср}}$, u , λ' , η из наблюдений n пар звезд и оценку точности производят так же, как в способе Деллена. Подбор звезд парами осуществляется значительно проще, чем четверками. Специальные исследования показывают, что для высоких широт обеспечивается достаточное число пар ярких звезд. Способ должен давать высокие по точности результаты, так как наблюдения здесь не связаны ни с отсчетами горизонтального лимба, ни с отсчетами окулярного микрометра.

Пример определения долготы пункта из наблюдений южных звезд в вертикалах северных звезд дан в табл. 100—102.

¹ Точное значение веса P_{y_i} вычисляется по формуле (12.14).

Пример

определения долготы [времени] из наблюдений южных звезд
в вертикалах северных звезд

Ж у р н а л н а б л ю д е н и й

Астрономический пункт *Ивановка* $\varphi = 55^\circ 45' 39,00''$, $u = +1,620^s$ в момент
 $X = 14^h 21,4^m$, $\omega = +0,144$

Теодолит АУ 2"/10" № 10062 $\frac{\tau}{2} = 0,513''$

$$\frac{\mu}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) = +0,60''$$

Дата 3—4 июня 1970 г. Наблюдатель *В. Г. Львов*

П а р а № 6

$$70 - N, \quad z_N = 71^\circ 30'; \quad \text{ctg } z_N = 0,3327, \quad 352 - S, \quad z_S = 39^\circ 10'$$

$$\text{cosec } z_N = 1,0538 \quad \text{ctg } z_S = 1,2276$$

$$\text{cosec } z_S = 1,5833$$

$$\begin{array}{cccc} 33,2-10,5 & 14,4-37,3 & 10,8-33,6 & 37,9-15,0 \\ \hline 33,2-10,5 & 14,4-37,3 & 10,9-33,7 & 37,9-15,0 \\ \hline 33,20-10,50 & 14,40-37,30 & 10,85-33,65 & 37,90-15,00 \end{array}$$

$$(\text{Л} + \text{П})_0 = 43,70 \quad {}_0(\text{Л} + \text{П}) = 51,70 \quad {}_0(\text{Л} + \text{П}) = 44,50 \quad (\text{Л} + \text{П})_0 = 52,90$$

$$b_N^{\partial/2} = \frac{(\text{Л} + \text{П})_0 - {}_0(\text{Л} + \text{П})}{2} = -4,00$$

$$b_S^{\partial/2} = \frac{(\text{Л} + \text{П})_0 - {}_0(\text{Л} + \text{П})}{2} = +4,20$$

$$b_N \frac{\tau}{2} \text{ctg } z_N = -0,68'' \quad b_S \frac{\tau}{2} \text{ctg } z_S = +2,64''$$

$$\frac{\mu}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) \text{cosec } z_N = +0,63'' \quad \frac{\mu}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) \text{cosec } z_S = +0,94''$$

T_L	T_R	T_{H_N}	$T_{R'}$	T_L	T_{H_S}
$14^h 26^m 23,59^s$	$14^h 33^m 03,36^s$	$14^h 29^m 43,48^s$	$14^h 28^m 28,57^s$	$14^h 31^m 20,00^s$	$14^h 29^m 54,28^s$
26,28	00,88	43,58	30,17	18,47	54,32
28,65	32 58,65	43,65	31,62	16,88	54,25
31,16	56,41	43,78	33,30	15,37	54,34
33,80	53,90	43,85	34,87	13,60	54,24
36,29	51,58	43,98	36,33	12,04	54,18
38,76	49,28	44,02	38,11	10,52	54,32
41,24	46,81	44,02	39,75	08,88	54,32
43,80	44,15	43,92	41,33	07,27	54,30
46,15	41,44	43,80	42,85	05,72	54,28

$$14^h 26^m 34,972^s \quad | \quad 14^h 32^m 52,646^s \quad | \quad 14^h 29^m 43,808^s \quad | \quad 14^h 28^m 35,690^s \quad | \quad 14^h 31^m 12,875^s \quad | \quad 14^h 29^m 54,283^s$$

$$\Delta T_N = T_{H_N} - T_{L_N} = 3^m 09^s = 189^s, \quad \Delta T_S = T_{H_S} - T_{R_S} = 78^s,$$

$$5,454 \left(\frac{\Delta T_N}{100} \right)^2 = 19,482'' \quad 5,454 \left(\frac{\Delta T_S}{100} \right)^2 = 3,316''$$

Вычисление y_i и δT_i Пункт *Ивановка* $\varphi = 55^\circ 45' 39,00''$ $\sec \varphi = 1,777307, \quad \operatorname{tg} \varphi = 1,469294$

Обозначения	3/4 июня 1970 г., пара № 6	
	Номер звезды	
	70 — N	352 — S
T_H	$14^{\text{h}}29^{\text{m}}43,803^{\text{s}}$	$14^{\text{h}}29^{\text{m}}54,283^{\text{s}}$
u_0	+1,620	+1,620
$\omega (T_H - X)$	+0,020	+0,020
s	14 29 45,443	14 29 55,923
α	2 52 06,980	14 39 21,096
t_0^{h}	11 37 38,468	23 50 34,227
t_0°	$174^\circ 24' 37,02''$	$357^\circ 38' 33,40''$
δ	52 38 31,28	16 32 33,51
$\operatorname{ctg} \delta$	0,763396	3,366730
m	1,356790	5,983734
n	1,121653	4,946731
$\sin t$	0,097404	-0,041133
$\cos t$	-0,995245	0,999154
$n \sin t$	0,132157	-0,246129
$n \cos t - 1$	-2,116320	3,942546
$\operatorname{tg} A'_N$	-0,062447	-0,062439
A'_N	$356^\circ 25' 36,10''$	$176^\circ 25' 39,30''$
δA	+0,19	-0,28
ΔA_W	+0,28	+0,50
$b \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z$	+0,68	-2,64
$\frac{1}{2} (\text{Шк} - M_X) \operatorname{cosec} z$	+0,63	+0,94
A_N	356 25 38,08	176 25 38,32
$A_N \pm 180^\circ - A_S$		-0,24''
$\operatorname{ctg} z_N + \operatorname{ctg} z_S$		1,5603
y_i		-0,15''
$P_{y_i} = [\cos^2 z_i] -$ $\frac{[\cos z \sin z \cos A]^2}{[\sin^2 z_i]}$		0,56
$\delta T_i^s = \frac{1}{15} y_i \sec \varphi$		-0,018 ^s
k_1	0,1546	0,5700
k_2	0,1925	0,6350
$\sin A_N$	-0,0623	+0,0623
$\sin 2A_N$	-0,1244	-0,1244
$\frac{d^2 A}{dt^2}$	+0,0143	+0,1500

Вычисление $y_{\text{ср}}$ и долготы пункта

Дата	Программа	Номер пары	y_i	P_{y_i}	v_{y_i}
1	2	3	4	5	6
2/3.6.1970 г.	РАТ—18—РЕС—19	1	-0,18"	0,71	+0,10
		2	-0,14	0,63	+0,06
		3	+0,10	0,38	-0,18
		4	+0,03	0,70	-0,11
3/4.6.1970 г.	РЕС—17—РАТ—18	6	-0,15	0,56	+0,07
		7	+0,75	0,82	-0,83
		8	-0,18	0,64	+0,10
3/4.6.1970 г.	РАТ—18—РАТ—20	9	+0,62	0,54	-0,70
		10	-0,14	0,49	+0,06
		11	-0,14	0,73	+0,06
		12	+0,20	0,86	-0,28
		14	-0,02	0,92	-0,06
		15	+0,08	0,55	-0,16
		17	-1,05	0,78	+0,97
8/9.6.1970 г.	РАТ—18—РЕС—19	18	-0,31	0,85	+0,23
		19	-0,33	0,83	+0,25
		20	-0,76	0,42	+0,68
		21	-0,78	0,73	+0,70
8/9.6.1970 г.	РЕС—19—РАТ—20	22	-0,87	0,41	+0,79
		23	-0,27	0,88	+0,19
		24	+0,14	0,92	-0,22
		26	-0,74	0,54	+0,66
		27	+0,51	0,69	-0,59
10/11.6	РАТ—18—РЕС—19	28	-0,03	0,35	-0,05
		29	+0,57	0,86	-0,65
		30	+0,46	0,92	-0,54

$$y_{\text{ср}} = \frac{[y_i P_{y_i}]}{[P_{y_i}]} = \frac{-1,352}{17,71} = -0,08''$$

$$\lambda' = \lambda_0 + \frac{1}{15} y_{\text{ср}} \sec \varphi = 2^{\text{h}}30^{\text{m}}00,00^{\text{s}} - 0,009^{\text{s}} = 2^{\text{h}}29^{\text{m}}59,991^{\text{s}}$$

$$M_{y_{\text{ср}}} = \sqrt{\frac{[P_{y_i} v_{y_i}^2]}{(n-1)[P_{y_i}]} = 0,01''$$

$$M_{\lambda'} = \frac{1}{15} M_{y_{\text{ср}}} \sec \varphi = 0,001^{\text{s}}$$

§ 96. ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ АЗИМУТАЛЬНОЙ ЛИЧНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ РАЗНОСТИ

В главе 9 были рассмотрены общие положения об определении лично-инструментальной разности и ее учете при определениях долгот полевых пунктов и геодезических азимутов направлений.

Принципиально определение лично-инструментальной разности в основном пункте должно выполняться по той же методике

и при тех же условиях выбора звезд, что и при определениях долгот и азимутов на полевых пунктах.

Указанное положение не вызывает никаких затруднений в вопросе установления методики определения лично-инструментальной разности и ее учета в долготах пунктов.

Что же касается определения лично-инструментальной разности для ее учета при определениях геодезических азимутов, то этот вопрос в настоящее время еще не решен и подлежит тщательному исследованию. Сущность проблемы состоит в том, что выгоднейшие условия выбора звезд для непосредственного метода определения геодезического азимута резко отличаются от выгоднейших условий определения постоянной составляющей ∂T лично-инструментальной погрешности.

В целях отождествления условий наблюдений звезд при определении азимута с условиями определения лично-инструментальной разности инструкция рекомендует определять последнюю из наблюдений звезд на больших зенитных расстояниях ($50—75^\circ$). Подобное решение указанной проблемы нельзя признать удачным, так как погрешность определения лично-инструментальной разности при таком выборе звезд будет весьма большой.

Действительно, на основании (9.138) ожидаемую погрешность определения лично-инструментальной разности можно представить в виде

$$m_{\partial T} = \frac{1}{15} M_y \sec \varphi = \frac{1}{15} \frac{\mu \sec \varphi}{\cos z_{\text{cp}} \sqrt{n}}. \quad (12.36)$$

Полагая для 2-секундного астрономического теодолита с контактным микрометром минимальное значение $\mu = 0,8''$, для широты $\varphi = 55^\circ$ из наблюдений одной пары звезд на среднем зенитном расстоянии $z_{\text{cp}} = 60^\circ$ получим $m_{\partial T} = 0,13^s$, а для двухчасовой серии из 4—5 пар $m_{\partial T} = 0,07^s!$

Учитывая, что при наблюдениях в невыгодных условиях возможны значительные колебания величины лично-инструментальной разности между отдельными сериями и вечерами, действительную ожидаемую погрешность среднего вывода из наблюдений 36—40 пар следует полагать $M_{\partial T} = 0,04^s$.

Имеющийся опыт определения азимутальной лично-инструментальной разности по методике, рекомендуемой инструкцией, полностью подтверждает наши теоретические выводы. Погрешность определения лично-инструментальной разности, получаемая из наблюдений 36—40 пар звезд, более чем в два раза превышает погрешность определения геодезического азимута из наблюдений 10—12 пар звезд.

Подобная методика определения лично-инструментальной разности не может удовлетворять высокоточным определениям геодезического азимута. Очевидный недостаток этой методики состоит в том, что определение ∂T производят из наблюдений звезд

на больших зенитных расстояниях, выгодных для определения азимута, но не времени.

Предположение о возможном изменении величины δT с изменением зенитных расстояний звезд для наблюдений с контактными микрометром не имеет веских оснований. Действительно, на примере определения долготы пункта (поправки часов) из наблюдений пар звезд в меридиане [формула (12.31)] видно, что в разности $N'_N - N'_S$ при условии наблюдений северной и южной звезд на близких зенитных расстояниях, почти полностью исключается влияние систематических инструментальных погрешностей, независимо от зенитных расстояний наблюдаемых светил. Влияние постоянной составляющей ΔT лично-инструментальной погрешности, зависящей от метода наблюдений прохождений звезд и индивидуальных особенностей наблюдателя, при работе с контактными микрометром можно также считать независимым от выбора звезд по зенитным расстояниям. Специальные исследования изменений ΔT с изменением склонений звезд для наблюдений пассажным инструментом с контактными микрометром позволяют утверждать, что если такие изменения и есть, то они не выходят за пределы точности определений и с ними практически можно не считаться. Указанные небольшие изменения ΔT можно объяснить возрастанием влияния случайных погрешностей определения времени с увеличением зенитных расстояний наблюдаемых звезд.

Опыт определений поправок часов в службах времени позволяет констатировать достаточно высокую стабильность личных погрешностей наблюдателя при наблюдениях звезд с контактными микрометром в относительно широком диапазоне по зенитным расстояниям.

Изложенное полностью подтверждается имеющимся опытом определения геодезических азимутов непосредственным методом. Характерной особенностью этого метода является высокая стабильность результатов определения азимута не только одним и тем же, но и различными способами, отличающимися между собой выбором вертикала для наблюдений прохождений звезд. Определение азимута одного и того же направления из наблюдений звезд в разных вертикалах, в вертикале местного предмета, в первом вертикале, в меридиане или вблизи него из наблюдений пар звезд на равных высотах и т. д. дают практически одинаковые конечные результаты, различающиеся между собой в пределах случайных погрешностей наблюдений. Этот вывод, основанный на значительном экспериментальном материале, свидетельствует о неизменности влияния лично-инструментальной погрешности на определяемый азимут направления, независимо от выбора вертикала для наблюдений прохождений звезд.

Кроме того, при наблюдениях звезд в широком диапазоне по зенитным расстояниям ($50^\circ < z < 80^\circ$) и симметричном их расположении относительно зенита практически не удастся обнаружить

систематических расхождений в азимутах одного и того же направления, определенных разными приборами. Это свидетельствует о почти полном исключении влияния систематических инструментальных погрешностей на азимут направления, определенный непосредственным методом.

На основании изложенного можно сделать следующие основные выводы.

1. Независимо от способа непосредственного определения геодезического азимута азимутальную лично-инструментальную разность на основном пункте следует определять из наблюдений групп или пар звезд в меридиане или вблизи него.

2. Величина лично-инструментальной разности остается практически неизменной с изменением зенитных расстояний наблюдаемых светил (вследствие компенсации систематических инструментальных погрешностей при наблюдениях южных и северных звезд в группах или парах, примерно на одинаковых z). Поэтому для определения лично-инструментальной разности с максимальной точностью светила необходимо наблюдать на малых зенитных расстояниях ($z < 40^\circ$), располагая их симметрично относительно зенита.

3. Методика наблюдений звезд при определении азимутальной лично-инструментальной разности должна быть сходна с методикой наблюдений звезд при определениях азимутов направлений на полевых пунктах. Практически для определения лично-инструментальной разности можно применять рассмотренные выше способы определения долготы по наблюдениям серий или пар звезд в меридиане или вблизи него.

§ 97. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ n ЗВЕЗД В ПЕРВОМ ВЕРТИКАЛЕ

Для определения широты пункта с максимальной точностью [см. формулу (9.65)] наблюдения светил необходимо производить в первом вертикале, на малых зенитных расстояниях, равным числом, по обе стороны от зенита. При работе с теодолитом, установленным на обычном астрономическом столбе или штативе, наблюдения звезд целесообразно производить в вертикале миры, выставленной в плоскости первого вертикала. При этом устойчивость подставки теодолита по азимуту потребует в течение промежутка времени, необходимого для наблюдения прохождения одной звезды при двух положениях вертикального круга, т. е. в течение 5—7 мин.

Сущность способа состоит в измерении малого горизонтального угла Q'_i между плоскостями вертикала миры и вертикала звезды в средний момент T_{H_i} ее наблюдения при двух положениях прибора. Наблюдения можно производить как с помощью контактного микрометра, так и со специальной боковой сеткой нитей. Выбор звезд для определения широты производится с помощью «Эфемерид для наблюдений звезд в первом вертикале».

При наблюдениях с контактным микрометром малый горизонтальный угол Q'_i вычисляется по формуле (12.1).

При наблюдениях с боковой сеткой нитей, когда визирование на местный предмет производится средней вертикальной нитью, а наблюдение моментов прохождений звезды — на боковых нитях, малый горизонтальный угол Q'_i определяется соответственно формулами

$$Q' = b_{\Delta} \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_{\Delta} + \Delta M_{\text{н}} - \left(b^* \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z^* + cq + \Delta N_{\text{н}} \right) \quad (12.1')$$

или при $|h_{\Delta}| < 1^{\circ}$

$$Q' = (\Delta M_{\text{н}} - \Delta N_{\text{н}}) - \left(b^* \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z + cq \right). \quad (12.1'')$$

Для каждого измеренного горизонтального угла Q'_i можно составить уравнение поправок вида (9.39). Имея в виду, что для звезд в первом вертикале $\sin A = \pm 1$, а $\cos A = 0$, получим

$$\begin{aligned} \Delta a' \pm x \operatorname{ctg} z_i + \\ + \left[a_0 - \left(A'_{0i} + \Delta A_{W_i} + (Mx \pm \text{Шк}) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} z \right) \right] - Q'_i = v_i \end{aligned} \quad (12.37)$$

с весом $P_i = \sin^2 z_i$,

где

$$\operatorname{ctg} A'_{0i} = \sin \varphi_0 \operatorname{ctg} t_{0i} - \cos \varphi_0 \operatorname{tg} \delta_i \operatorname{cosec} t_{0i},$$

$$t_{0i} = T_{H_i} + u_0 + \omega (T_{H_i} - X) - \alpha_i.$$

Знак плюс перед вторым членом уравнения (12.37) ставится для звезд на западе, а минус — на востоке.

Поправка азимута светила за ускорение вычисляется по формуле (9.95), в которой

$$\frac{d^2 A}{dt^2} = k_1 \sin A_1 - k_2 \sin 2A_1 = \pm k_1. \quad (12.38)$$

Величина $k_1 = 0,5 \sin 2\varphi \operatorname{ctg} z$ выбирается из таблиц прил. 2 по аргументам φ и z . Знак плюс перед k_1 ставится для восточных звезд, а минус для западных. По наблюдениям n звезд в вертикале мира составляют n уравнений поправок вида (12.37). Решив их совместно по методу наименьших квадратов, получают вероятнейшие значения широты и азимута и оценивают точность их вывода. Уравненные значения неизвестных получают по общим стандартным формулам

$$\Delta a' = \frac{\Delta a'}{\Delta}, \quad x = \frac{\Delta x}{\Delta},$$

в которых

$$\Delta = \begin{vmatrix} [P] [Pb] \\ [Pb] [Pbb] \end{vmatrix}; \quad \Delta a' = \begin{vmatrix} [Pb] [Pl] \\ [Pbb] [Pbl] \end{vmatrix}; \quad \Delta x = - \begin{vmatrix} [P] [Pl] \\ [Pb] [Pbl] \end{vmatrix}.$$

Веса уравненных значений неизвестных находят из выражений (9.64"); (9.65") по формулам

$$P_{a'} = \frac{\Delta}{[Pbb]} = [\sin^2 z] - \frac{[\sin z \cos z \sin A]^2}{[\cos^2 z]};$$

$$P_x = \frac{\Delta}{[P]} = [\cos^2 z] - \frac{[\sin z \cos z \sin A]^2}{[\sin^2 z]}.$$

При соблюдении условия симметричности выбора звезд относительно зенита $[\sin z \cos z \sin A] \approx 0$, и веса уравненных значений неизвестных определяются с достаточной точностью из выражений

$$P_{a'} = [\sin^2 z]; \quad P_x = [\cos^2 z]. \quad (12.39)$$

Уравненные значения широты, составляющей ξ и условного азимута будут

$$\varphi = \varphi_0 + x; \quad \xi = x + (\varphi_0 - B); \quad a' = a_0 + \Delta a'.$$

Оценка точности производится по известным формулам

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{n-2}}, \quad \text{где } [Pv^2] = [Pl\ell] + [Pl] \Delta a' + [Pbl] x;$$

$$M_x = M_\varphi = \mu \sqrt{\frac{1}{P_x}}; \quad M_\xi = \sqrt{M_x^2 + M_B^2};$$

$$M_{a'} = \mu \sqrt{\frac{1}{P_{a'}}}.$$

Полагая для наблюдений 2-секундным теодолитом $\mu = 1,2''$, нетрудно рассчитать, что для определения широты с погрешностью, не превышающей $0,3''$, необходимо произвести наблюдения 20—24 звезд, расположенных симметрично относительно зенита, на среднем зенитном расстоянии $z_{cp} = 20^\circ$.

При наблюдениях звезд пассажным инструментом сущность способа, очевидно, не изменится. В этом случае надобность в применении миры отпадает. Для определения широты большой круг пассажного инструмента ориентируется в первом вертикале с погрешностью, не превышающей $1'$. Наблюдения производятся короткими сериями по 8—10 звезд в интервале 1,5—2 ч, в течение которого азимут прибора можно полагать неизменным. Каждая серия замыкается приемами радиосигналов времени, из которых определяют поправку и ход хронометра. Для точных определений широты среднее зенитное расстояние звезд не должно превышать 20° . Восточные и западные звезды подбирают так, чтобы примерно соблюдалось условие симметричности

$$[\sin z \cos z \sin A] \approx 0.$$

Для каждой наблюдаемой звезды составляют уравнение поправок (12.37), в котором полагают $a_0 = 90^\circ$. Из решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов находят уравненные значения широты и азимута и оценивают точность их вывода.

§ 98. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ПАР ЗВЕЗД В ПЕРВОМ ВЕРТИКАЛЕ

На основании уравнения (12.37) для определения широты необходимо произвести наблюдения минимум двух звезд в первом вертикале. Для каждой пары звезд, наблюдаемых в вертикале

Пример

определения широты из наблюдений пар звезд в первом вертикале

Журнал наблюдений

Пункт *Комсомольский*, $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40''$, $\lambda_0 = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34,50^{\text{s}}$
 Азимут миры $a_0 = 269^\circ 58' 20''$, $z_{\Delta} = 88^\circ 51' 35''$, $\text{cosec } z_{\Delta} = 1,00020$

Теодолит ДКМ-3А № 8645, $\frac{\tau}{2} = 1,102''$, $\mu = 0,9630''$

(Шк — Мх) $\frac{R}{2} = 0,55''$, $c = 520,0''$

Дата 30.9.1977 г. Наблюдатель *Ю. А. Зуев*

Пара № 13 (390 W и 529 E)

390 W, $m = 4,9$

$z_L = 32^\circ 19'$; $z_{\text{ср}} = 32^\circ 34'$; $z_R = 32^\circ 49'$; $\text{cosec } z_L = 1,8706$;
 $\text{ctg } z_{\text{ср}} = 1,5657$; $\text{cosec } z_R = 1,8452$; $q = +0,0127$

Мира КЛ

$10^{\circ 6}$, $12,6^{\circ}$

11,8

12,7

$10^{\circ 5}$, $12,37^{\circ}$

$$\frac{m_L - m_R}{2} = +18,85^{\circ}$$

$$\frac{m_L - m_R}{2} \mu \text{cosec } z_{\Delta} = +18,16''$$

$$-\Delta N_b = +0,20$$

$$-cq = +6,60$$

$$Q' = +24,96$$

Мира КП

$9^{\circ 6}$, $94,5^{\circ}$

94,6

94,9

$9^{\circ 6}$, $94,67^{\circ}$

Звезда КЛ

$15^{\text{h}}35^{\text{m}}00,061^{\text{s}}$

01,998

03,750

06,267

08,272

10,405

12,467

14,802

16,666

18,248

$T_L = 15^{\text{h}}35^{\text{m}}09,295^{\text{s}}$

Уровень

27,5—13,5

28,5—14,0

28,00—13,75

$(\text{Л} + \text{П})_0 = 41,75$

$b^{\delta/2} = -0,12$

$\Delta N_b = -0,20''$

$T_H = 15^{\text{h}}36^{\text{m}}36,842^{\text{s}}$

$\Delta T = 87,547$

$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 4,180$

$W = -k_1 = -0,7351$

$\Delta A_W = -3,28''$

Уровень

14,0—28,0

14,0—28,0

14,00—28,00

$(\text{П} + \text{Л}) = 42,00$

Звезда КП

$15^{\text{h}}37^{\text{m}}53,473^{\text{s}}$

57,307

59,390

38 01,563

03,458

05,507

07,692

09,168

11,081

13,252

$T_R = 15^{\text{h}}38^{\text{m}}04,389^{\text{s}}$

$$\frac{1}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2} \text{cosec } z = +1,02''$$

529 E, $m = 5,0$

$z_L = 28^\circ 56'$; $z_{\text{ср}} = 28^\circ 38'$; $z_R = 28^\circ 20'$; $\text{cosec } z_L = 2,0670$

$\text{ctg } z_{\text{ср}} = 1,8316$; $\text{cosec } z_R = 2,1070$; $q = -0,0200$

Мира КП

$9^{\circ 6}$, $81,6^{\circ}$

82,0

81,7

$9^{\circ 6}$, $81,77^{\circ}$

$$\frac{m_L - m_R}{2} = +33,25^{\circ}$$

$$\frac{m_L - m_R}{2} \mu \text{cosec } z_{\Delta} = +32,03''$$

$$-\Delta N_b = -5,55$$

$$cq = -10,40$$

$$Q' = -16,08''$$

Мира КЛ

$10^{\circ 6}$, $28,4^{\circ}$

27,9

28,5

$10^{\circ 6}$, $28,27^{\circ}$

Звезда КЛ	Уровень		Уровень	Звезда КП
15 ^h 42 ^m 06,631 ^s	29,5—15,5	$b^{\delta/2} = +2,75$	12,0—26,5	15 ^h 45 ^m 25,672 ^s
08,677	29,5—15,5	$\Delta N_b = +5,55''$	13,0—27,5	27,801
11,193	29,50—15,50		12,50—27,00	30,585
13,491	$(\text{Л} + \text{П})_o = 45,00$		$o(\text{Л} + \text{П}) = 39,50$	32,855
15,497		$T_H = 15^h 43^m 56,280^s$		34,695
17,547		$\Delta T = 99,802$		37,119
19,720		$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 5,432''$		39,780
22,044				41,992
23,717		$W = +k_1 = +0,9174$		43,967
26,263				46,365
$T_L = 15^h 42^m 16,478^s$		$\Delta A_W = +4,98''$		$T_R = 15^h 45^m 36,083^s$

$$\frac{1}{2} (\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} z = 1,15''.$$

Вычисление свободных членов уравнений поправок

Пункт *Комсомольский*, $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40''$ $\sin \varphi_0 = 0,706832$
 $\cos \varphi_0 = 0,707381$

Обозначения	Пара № 13	
	Номер звезды	
	390 — W	529 — E
T_H	15 ^h 36 ^m 36,842 ^s	15 ^h 43 ^m 56,280 ^s
u_0	3 19 16,040	3 19 16,040
$\omega (T_H - X)$	-6,345	-5,152
s	18 55 46,537	19 02 67,168
α	16 07 46,475	21 33 27,813
t^h	2 48 00,062	21 29 39,355
t°	42° 00' 00,93''	322° 24' 50,33''
δ	+36 34 28,35	+38 23 25,96
$\operatorname{tg} \delta$	0,741977	0,792321
$\operatorname{ctg} t$	1,110603	-1,299182
$\operatorname{cosec} t$	1,494469	-1,639474
$\operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t$	1,108862	-1,298990
$\sin \varphi_0 \operatorname{ctg} t$	0,785010	-0,918303
$\cos \varphi \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t$	0,784388	-0,918881
$\operatorname{ctg} A'_0$	+0,000622	+0,000578
A'_0	269° 57' 51,67''	89° 58' 00,82''
ΔA_W	-3,28''	+4,98''
$(\text{Шк} - \text{Мх}) \frac{R}{2} \operatorname{cosec} z$	+1,02	+1,15
A_0	269 57 49,41	89 58 06,95
Q'	0 00 24,96	180 00 16,08
a_i	269 58 14,37	269 58 23,03
a_0	269 58 20,00	—
l	+5,63''	-3,03''
$l_E - l_W$		-8,66

Вычисление x

$\sin z_E$	0,4792	$\cos z_E$	0,878
$\sin z_W$	0,5383	$\cos z_W$	0,843
$z_E + z_W$	$60^\circ 12'$		
$\sin z_E \sin z_W$	0,2580		
$\sin (z_E + z_W)$	0,8763		
$k = \frac{\sin z_E \sin z_W}{\sin (z_E + z_W)}$	0,2944		
$x = k (l_E - l_W)$	$-2,55''$	$P_x = [\cos^2 z]$	1,48

миры (в вертикале пассажного инструмента), по обе стороны от зенита, будем иметь

$$x = \frac{\Delta_x}{\Delta} = \frac{\sin z_E \sin z_W}{\sin (z_E + z_W)} (l_E - l_W) \quad (12.40)$$

или

$$x = \frac{l_E - l_W}{\operatorname{ctg} z_E + \operatorname{ctg} z_W} \text{ с весом } P_x = [\cos^2 z]. \quad (12.40')$$

Уравненное значение $x_{\text{ср}}$ из наблюдений n пар звезд находят как среднее весовое

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum x_i P_{x_i}}{\sum P_{x_i}} \text{ с весом } P_{x_{\text{ср}}} = \sum P_{x_i}. \quad (12.41)$$

Уравненное значение широты будет

$$\varphi = \varphi_0 + x_{\text{ср}} \text{ с весом } P_\varphi = P_{x_{\text{ср}}}.$$

Оценка точности производится по известной формуле

$$M_\varphi = \sqrt{\frac{[P_{x_i} v_{x_i}^2]}{(n-1)[P_{x_i}]}}; \quad v_{x_i} = x_{\text{ср}} - x_i. \quad (12.42)$$

Пример определения широты из наблюдений пар звезд в первом вертикале приведен в табл. 103—104.

Уравнивание результатов определения x

Дата	Номер пары	Номер звезды	$P x_i$	x_i	v_i	v^2
26—27.9.1977 г.	1	497 W 20 E	1,69	-2,15"	-0,02"	0,0004
	2	491 W 57 E	1,33	-1,90	-0,27	0,0729
	3	501 W 529 ^a E	1,51	-2,70	+0,53	0,2809
	4	501 W 62 E	1,47	-3,05	+0,88	0,7744
	5	76 E 564 W	1,65	-2,20	+0,03	0,0009
	6	102 E 54 [?] W	1,28	-1,84	-0,33	0,1089
	7	132 E 5 W	1,38	-1,70	-0,47	0,2209
28—28.9.1977 г.	8	708 W 171 E	1,45	-2,60	+0,43	0,1849
	9	712 E 529 W	1,44	-1,53	-0,64	0,4096
	10	163 E 53 W	1,70	-1,47	-0,70	0,4900
	11	11 W 209 E	1,15	-2,08	-0,09	0,0081
	12	518 E 722 W	1,44	-2,70	+0,53	0,2809
30.9.1977 г.	13	390 W 529 E	1,48	-2,55	+0,38	0,1444
	14	529 ^a E 418 W	1,58	-1,68	-0,49	0,2401
	15	420 W 555 E	1,53	-2,35	+0,18	0,0324

$$[P_x] = 22,08; \quad [x_i P_{x_i}] = -47,83''; \quad [P v^2] = 4,854$$

$$x_{cp} = \frac{[x_i P_{x_i}]}{[P_x]} = -\frac{47,83''}{22,08} = -2,17''$$

$$\mu = \sqrt{\frac{[P v^2]}{n-1}} = \sqrt{\frac{4,854}{14}} = 0,59''; \quad m_x = \frac{\mu}{\sqrt{[P_x]}} = \frac{0,59''}{\sqrt{22,08}} = 0,12''$$

$$\varphi = \varphi_0 + x_{cp} = 44^\circ 58' 40,00'' - 2,17'' = 44^\circ 58' 37,83''$$

$$M_\varphi = m_x = 0,12''$$

$$\xi = x_{cp} + (\varphi_0 - B) = -2,17'' + (44^\circ 58' 40,0'' - 44^\circ 58' 32,25'') = +5,58''$$

$$m_\xi = \sqrt{m_x^2 + m_B^2} = \sqrt{(0,12)^2 + (0,01)^2} = 0,12''$$

РАЗДЕЛ IV

ПРИБЛИЖЕННЫЕ СПОСОБЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Астрономические определения географических координат и азимута находят широкое применение в прикладной геодезии, при геодезическом обеспечении различных инженерных работ:

развитии и ориентировании геодезических сетей в местной системе координат;

автономном определении азимутов и дирекционных углов ориентирных направлений;

контроле угловых измерений в полигонометрических ходах и других угловых построениях;

эталонировании гироскопических приборов, применяемых в маркшейдерском деле и других инженерных работах, и т. д.

Как правило, точность определения широты, долготы и азимута направления во всех указанных случаях значительно ниже, чем точность соответствующих определений на пунктах Лапласа в астрономо-геодезической сети. В этом смысле методику и способы таких астрономических определений можно назвать «приближенными». Для астрономических определений широты, долготы и азимута с точностью 3—5" и грубее можно применять средние и малые оптические теодолиты, снабженные астрономической сеткой нитей. Вместо хронометров целесообразно использовать для наблюдений двухстрелочные секундомеры или палубные часы.

В приближенных способах астрономических определений существенно упрощаются методика наблюдений светил и их обработка.

В настоящем разделе будут рассмотрены наиболее целесообразные зенитальные и азимутальные способы приближенных астрономических определений.

ГЛАВА 13

ПРИБЛИЖЕННЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ, ДОЛГОТЫ И АЗИМУТА ЗЕНИТАЛЬНЫМИ СПОСОБАМИ

§ 99. ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ СПОСОБОМ СОМНЕРА С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ТЕОДОЛИТА И ДВУХСТРЕЛОЧНОГО СЕКУНДОМЕРА

Теоретические основы способа Сомнера, а также методика наблюдений этим способом с помощью астрономического теодолита и обычного механического хронометра были подробно изложены в главе 6. Напомним, что для приближенных астрономических определений рассматриваемый способ обладает целым рядом несомненных достоинств. Он позволяет в короткий срок по наблюдениям небольшого числа светил получить обе координаты: φ и λ . Для ночных наблюдений этим способом не требуется составления специальных эфемерид звезд; используются яркие звезды, выбор которых производится визуально. Вследствие этого способ является гибким: он позволяет производить наблюдения в трудных метеорологических условиях — наблюдать звезды в просветах облаков, что нельзя осуществить в других способах. При наличии эфемерид ярких звезд способ с успехом можно применить в дневное время. При этом в программу наблюдений можно также включить Солнце и планеты.

Благодаря указанным достоинствам способ Сомнера находит широкое применение при определении географических координат пунктов в различных экспедиционных условиях.

1. Методика приема сигналов координированного времени с помощью двухстрелочного секундомера 51 СД

Завод секундомера и его включение производят за 40—60 мин до приема радиосигналов времени, с тем чтобы не работать при максимальном напряжении пружины, где возможны большие изменения хода секундомера.

Показания минутной стрелки секундомера при наблюдениях звезд целесообразно согласовать с минутами местного звездного времени. Для этой цели предварительно по местному звездному времени устанавливаются ручные или карманные часы с точностью 1^m .

Если часы были поставлены по декретному времени, то расчет их установки по местному звездному времени для некоторого момента T_{N+1} декретного времени производят по известным формулам:

$$UT = T_{N+1} - (N + 1);$$

$$s = S_0 + UT + \mu UT + \lambda_0,$$

где UT — всемирное время, соответствующее моменту T_{N+1} декретного времени, N — номер часового пояса, в котором находится наблюдатель, μUT — поправка за перевод единиц среднего времени в звездные единицы, S_0 — звездное время в среднюю гринвическую полночь для даты наблюдения, λ_0 — предварительная долгота пункта, выраженная в часовой мере.

Согласование показаний минутных стрелок секундомера и часов производится в момент включения секундомера. При этом показание часов, поставленных по местному звездному времени, должны быть кратны целому часу или 30^m.

В дальнейшем при приеме радиосигналов времени или наблюдениях звезд целые часы и получасы снимаются с ручных часов, а минуты, секунды и их доли — с секундомера.

Методика приема сигналов точного времени с помощью секундомера состоит в следующем:

наблюдатель, слушая передачу радиосигналов, ведет счет сигналов (секунд) от начала каждой минуты и под любой сигнал производит нажатие стопорной кнопки вспомогательной стрелки; не теряя счета сигналов, записывает в журнал минуты и секунды всемирного времени, а также показание секундомера с точностью до десятых долей секунды;

нажатием стопорной кнопки совмещает вспомогательную и основную секундные стрелки;

продолжая счет сигналов, вновь нажимает под любой сигнал стопорную кнопку и записывает номер сигнала и показание секундомера и т. д.

При таком порядке приема сигналов времени в каждой минутной серии можно записать два-три показания секундомера.

Обработка приема секундных радиосигналов времени, вывод поправки и хода секундомера выполняются в следующем порядке: выводится всемирное время в средний момент подачи принятых

сигналов времени $UTC = \frac{\sum UTC_i}{n}$; $UT1 = UTC + (DUT1 +$

$+ dUT1)$ и показание секундомера в этот момент $X = \frac{\sum X_i}{n}$;

поправка секундомера в момент X в системе местного звездного времени вычисляется по формуле

$$u^* = s - X,$$

где $s = S_0 + UT1 + \mu UT1 + \lambda_0$;

**Определение поправки секундомера из приема сигналов
координированного времени**

Секундомер 51СД № 068537, 26 июня 1976 г.,
Пункт *Ивановка* $\lambda_0 = 1^h48^m54,0^s$, радиостанция РВМ, 10 МГц

Программное время передачи сигналов UTC _i	Показания секундомера X _i	Вычисление поправки в системе местного звездного времени
13 ^h 10 ^m 10 ^s	9 ^h 17 ^m 48,3 ^s	$S_0 = 18^h15^m37,70^s$ $UT1 = 13\ 11\ 30,46$ $\mu UT1 = 2\ 10,00$ <hr/> $\lambda_0 = 1\ 48\ 54,00$ $s = 9\ 18\ 12,16$ $X = 9\ 19\ 08,40$ <hr/> $u^* = -56,24^s$ в момент $X = 9^h19,1^m$
30	18 08,3	
50	28,3	
11 10	48,4	
30	19 08,4	
50	28,4	
12 10	48,4	
30	20 08,5	
50	28,5	
UTC = 13 ^h 11 ^m 30,00 ^s	X = 9 ^h 19 ^m 08,40 ^s	
DUT1 + dUT1 = +0,46		
UT1 = 13 ^h 11 ^m 30,46 ^s		

часовой ход секундомера в системе звездного времени определяется из приема радиосигналов двух станций по формуле

$$\omega = \frac{u_2^* - u_1^*}{(X_2 - X_1)^h}$$

Так как секундомер юстируется по среднему времени, то величина часового хода относительно звездного времени должна быть близка к $+10^s$; средняя квадратическая величина вариации часового хода не должна превышать $0,2^s$.

Пример приема и обработки радиосигналов времени приведен в табл. 105.

**2. Методика измерения зенитных расстояний светил
с помощью оптического теодолита
и двухстрелочного секундомера**

Общий порядок наблюдений при совместном определении широты и долготы способом Сомнера остается таким же, как и при наблюдениях с астрономическим теодолитом и хронометром:

прием радиосигналов времени;

измерение зенитных расстояний 6—8 звезд, равномерно расположенных по азимутам;

прием радиосигналов времени.

Перед наблюдениями звезд теодолит должен быть поверен, горизонтирован и ориентирован в меридиане нулем горизонталь-

ного лимба на Север. Измерение зенитных расстояний светил достаточно производить (при одном положении вертикального круга теодолита (КЛ).

Если оптический теодолит снабжен астрономической сеткой нитей, то порядок измерения зенитного расстояния каждого светила следующий:

наведение трубы теодолита на выбранное светило;

наблюдение прохождений светила через три горизонтальные нити методом «глаз—клавиша»; при наблюдениях светил этим методом с двухстрелочным секундомером в момент пересечения светилом горизонтальной нити нажимается стопорная кнопка вспомогательной секундной стрелки и снимается отсчет по секундомеру, после чего нажатием той же кнопки вспомогательная стрелка совмещается с основной секундной стрелкой секундомера; выбранные три горизонтальные нити должны быть одними и теми же для всех наблюдаемых звезд;

отсчет вертикального лимба; перед отсчетом совмещаются концы изображений пузырька контактного уровня при алидаде вертикального круга;

отсчет горизонтального лимба с точностью до 1'.

Для учета поправок зенитных расстояний звезд за влияние рефракции в начале и в конце наблюдений серии звезд записываются данные о температуре и атмосферном давлении.

Рассмотрим пример записи наблюдений в журнале.

Журнал измерения зенитных расстояний светил
(Способ Сомнера)

Дата 25 июня 1975 г.

Пункт Дерновка $\varphi_0 = 44^{\circ}58'40,0''$,

$\lambda_0 = 3^{\text{h}}16^{\text{m}}34'50^{\text{s}}$

Теодолит Theo 010 № 0319

Секундомер ИСД № 048116

$M^{\circ}z = 0^{\circ}00'00,0''$ $u_0 = +41,56^{\text{s}}$ в момент $X = 16^{\text{h}}02,4^{\text{m}}$ $\omega = +9,824^{\text{s}}$

$t_C = +18,0^{\circ}$ $B = 741,5$ мм рт. столба

Звезда α Суг (506)

Секундомер	Вертикальный лимб	Горизонтальный лимб (азимут)
10,3 ^s	44° 18' 47,4"	65° 41'
20,3	47,6	$\rho_0 = 56,6''$
16 ^h 21 ^m 30,3 ^s	44 18 47,5	$\gamma = 0,9724$
$T_H = 16^{\text{h}}21^{\text{m}}20,30^{\text{s}}$	$\rho = +53,8$	$B = 0,9757$
$u_0 = +41,56^{\text{s}}$	$z'_{\text{изм}} = 44^{\circ}19'41,3''$	$\rho = \rho_0 \gamma \cdot B = 53,8''$
$\omega (T_H - X) = +3,10$		
$sH = 16^{\text{h}}22^{\text{m}}04,96^{\text{s}}$		

Если теодолит не снабжен астрономической сеткой нитей, то наблюдаются три последовательных прохождения светил через одну и ту же горизонтальную нить. В этом случае для каждого

прохождения записываются показание секундомера и отсчет по вертикальному лимбу. Азимут светила записывается для среднего наблюдения. В журнале подсчитываются средний момент наблюдения светила и его среднее зенитное расстояние.

3. Обработка наблюдений

Обработка наблюдений принципиально остается такой же, как и при наблюдениях с астрономическим теодолитом (см. главу 6). Она включает:

- обработку приема радиосигналов времени, вывод поправки и хода секундомера;
- обработку журнала наблюдений;
- вычисление свободных членов уравнений поправок;
- графическое уравнивание результатов наблюдений, вывод вероятнейших значений широты и долготы;
- оценку точности.

Обработка приема радиосигналов времени, вывод поправки и хода двухстрелочного секундомера были рассмотрены выше.

Обработка журнала наблюдений светил состоит из:

вывода среднего момента наблюдения светил $T_H = \frac{\sum T_i}{n}$;

вычисления звездного времени наблюдения светила по формуле

$$s_H = T_H + u_0 + \omega(T_H - X);$$

вычисления измеренного зенитного расстояния светила по формуле

$$z'_{изм} = L - M^{\circ}_z + \rho,$$

где L — средний отсчет по вертикальному лимбу; M°_z — предварительное значение места зенита; $\rho = \rho_0 \gamma B$ — поправка измеренного зенитного расстояния за влияние рефракции.

Вычисление свободных членов уравнений поправок производится по известным формулам зенитальных способов

$$l'_i = z_{0_i} - z'_{изм_i},$$

где

$$\cos z_{0_i} = \frac{1}{2} [\cos(\varphi_0 - \delta_i)(1 + \cos t_{0_i}) - \cos(\varphi_0 + \delta_i)(1 - \cos t_{0_i})];$$

$$t_{0_i} = s_{H_i} - \alpha_i = T_{H_i} + u_0 + \omega(T_{H_i} - X) - \alpha_i.$$

Для удобства графического уравнивания ко всем свободным членам можно прибавить (или отнять) одну и ту же величину N , т. е.

$$l'_i = l_i \pm N,$$

при этом уравненные значения x и y (φ и λ) останутся без изменений.

Действия	Номер звезды 506	Действия	Номер звезды 506
SH	16 ^h 22 ^m 04,96 ^s	$\cos(\varphi_0 - \delta)$	0,999995
α	20 40 16,00	$1 + \cos t_0$	1,429786
t_0^h	-4 18 11,04	$\cos(\varphi_0 + \delta)$	-0,002272
t_0°	-64° 32' 45,6"	$1 - \cos t_0$	0,570214
φ_0	44 58 40,0	$\cos z_0$	0,715537
δ	45 09 08,5	z_0	44° 18' 45,9"
$\varphi_0 - \delta$	- 0 10 28,5	$z'_{\text{изм}}$	44 19 41,3
$\varphi_0 + \delta$	90 07 48,5	l	-55,4
		N	+70,0
		l'	+14,6
		A	65,7°

Пример вычисления свободного члена для звезды 506 приведен в табл. 106.

Графическое уравнивание результатов наблюдений, вывод вероятнейших значений широты и долготы, оценка точности уравненных величин производятся точно так же, как это было показано в главе 6.

§ 100. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗЕНИТНЫМ РАССТОЯНИЯМ ПОЛЯРНОЙ ЗВЕЗДЫ

Для приближенного определения широты с точностью нескольких секунд дуги целесообразно производить измерения зенитных расстояний Полярной звезды. При наблюдениях с оптическим теодолитом Theo-010 и секундомером (или часами) достаточно выполнить 2—3 приема измерения зенитного расстояния Полярной, чтобы определить широту пункта с погрешностью, не превышающей 3". Вычисления широты осуществляются быстро и просто с помощью таблиц Астрономического Ежегодника. Рассмотрим теоретические основы этих таблиц.

На рис. 92 изображен параллактический треугольник $PZ\sigma$ для Полярной звезды. Опустим сферический перпендикуляр σk из точки σ на меридиан PZ . Сферический прямоугольный треугольник $Pk\sigma$ мал, так как полярное расстояние Δ Полярной звезды в настоящее время меньше 1°.

Для приближенных определений решим этот треугольник как плоский, получим

$$f = \Delta \cos t, \quad (13.1)$$

где t — часовой угол Полярной в момент наблюдения.

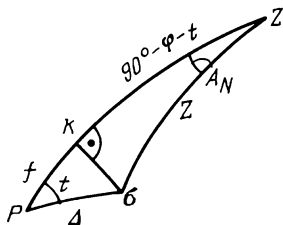


РИС. 92

Из прямоугольного сферического треугольника $Zk\sigma$ имеем

$$\cos A_N = \operatorname{ctg}(\varphi + f) \operatorname{ctg} z = \frac{\operatorname{tg}[90^\circ - (\varphi + f)]}{\operatorname{tg} z}. \quad (13.2)$$

Вычтем обе части этого уравнения из единицы, получим

$$\begin{aligned} 1 - \cos A_N &= 2 \sin^2 \frac{A_N}{2} = \frac{\operatorname{tg} z - \operatorname{tg}[90^\circ - (\varphi + f)]}{\operatorname{tg} z} = \\ &= \frac{\frac{\sin z}{\cos z} - \frac{\sin[90^\circ - \varphi - f]}{\cos(90^\circ - \varphi - f)}}{\operatorname{tg} z} = \\ &= \frac{\sin z \cos(90^\circ - \varphi - f) - \cos z \sin(90^\circ - \varphi - f)}{\cos z \cos(90^\circ - \varphi - f) \operatorname{tg} z} = \\ &= \frac{\sin[z - (90^\circ - \varphi - f)]}{\sin z \cos(90^\circ - \varphi - f)}, \end{aligned}$$

откуда

$$\sin[z - (90^\circ - \varphi - f)] = 2 \sin^2 \frac{A_N}{2} \sin z \cos(90^\circ - \varphi - f).$$

Величины $z - (90^\circ - \varphi - f)$ и A_N малы. Поэтому с достаточной для нас точностью можем разложить синусы этих величин в ряд и ограничиться первыми членами разложения. На этом же основании можем положить

$$\cos z = \cos(90^\circ - \varphi - f).$$

После разложения в ряд получим

$$z - (90^\circ - \varphi - f) = \frac{A_N^2}{2\rho} \sin z \cos z. \quad (13.3)$$

Азимут Полярной получим из сферического треугольника $PZ\sigma$ по формуле синусов

$$\sin A_N = \frac{\sin \Delta \sin t}{\sin z}.$$

Так как A_N и Δ малы, то будем иметь

$$A_N = \frac{\Delta \sin t}{\sin z}.$$

Подставив значение A_N в формулу (13.3) получим

$$z - 90^\circ + \varphi + f = \frac{\Delta^2}{2\rho} \sin^2 t \operatorname{ctg} z$$

или

$$\begin{aligned} \varphi &= 90^\circ - z - f + \frac{\Delta^2}{2\rho} \sin^2 t \operatorname{ctg} z = 90^\circ - z - \Delta \cos t + \\ &+ \frac{\Delta^2}{2\rho} \sin^2 t \operatorname{ctg} z. \end{aligned} \quad (13.4)$$

По формуле (13.4) и составлены таблицы Астрономического Ежегодника. При составлении таблиц координаты Полярной α_0 и δ_0 взяты на начало данного года. Для учета изменения координат в течение года имеются дополнительные таблицы, которые основаны на следующем.

Представим полярное расстояние Δ и часовой угол t в функции их значений на начало года и малых приращений, т. е.

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta\delta, \quad t = t_0 + \Delta\alpha.$$

Тогда

$$\Delta \cos t = (\Delta_0 + \Delta\delta) \cos (t_0 + \Delta\alpha),$$

где

$$\cos (t_0 + \Delta\alpha) = \cos t_0 \cos \Delta\alpha + \sin t_0 \sin \Delta\alpha = \cos t_0 + \frac{15\Delta\alpha^2}{\rho'} \sin t_0,$$

следовательно,

$$\Delta \cos t = \Delta_0 \cos t_0 + 15 \frac{\Delta_0}{\rho'} \sin t_0 \Delta\alpha + \cos t_0 \Delta\delta + 15 \sin t_0 \frac{\Delta\delta \Delta\alpha}{\rho'}.$$

Последний член этого выражения пренебрегаемо мал по сравнению с предыдущим.

Последнее слагаемое в выражении (13.4), вследствие его малости, можно представить в виде

$$\frac{\Delta^2}{2\rho'} \sin^2 t \operatorname{ctg} z = \frac{\Delta_0^2}{2\rho'} \sin^2 t_0 \operatorname{ctg} z.$$

Таким образом, окончательно имеем

$$\begin{aligned} \varphi = 90^\circ - z - \Delta_0 \cos t_0 + \frac{\Delta_0^2}{2\rho'} \sin^2 t_0 \operatorname{ctg} z - \\ - \frac{15\Delta_0}{\rho'} \sin t_0 \Delta\alpha + \Delta\delta \cos t_0. \end{aligned} \quad (13.5)$$

В таблицах Астрономического Ежегодника обозначено

$$I = -\Delta_0 \cos t_0, \quad II = \frac{\Delta_0^2}{2\rho'} \sin^2 t_0 \operatorname{ctg} z,$$

$$III = -15 \frac{\Delta_0}{\rho'} \sin t_0 \Delta\alpha + \Delta\delta \cos t_0.$$

С этими обозначениями широта вычисляется по формуле

$$\varphi = 90^\circ - z + I + II + III. \quad (13.5')$$

Из таблиц АЕ величину I выбирают по аргументу местного звездного времени s ; величину II — по аргументу s и высоте Полярной $h = 90^\circ - z$; величину III — по аргументу s и дате наблюдений.

Измерения зенитных расстояний Полярной производят при двух положениях вертикального круга.

Для учета влияния рефракции измеряют температуру воздуха и давление.

Поправку часов или секундомера необходимо знать с точностью до $0,1^m$.

Приведем пример определения широты по измеренному зенитному расстоянию Полярной.

Журнал наблюдений

22 июня 1975 г.

Теодолит Theo 010 № 0319

Пункт *Дерновка*

$$t_C^\circ = +17,0^\circ \quad B = 743,0 \text{ мм}, \quad u = +4,1^s \text{ в момент } X = 18^{\text{h}}30^{\text{m}}$$

КЛ

$$T_L = 18^{\text{h}}30^{\text{m}}20^{\text{s}}$$

$$L = 45^\circ 21' 00'' 01'' 02$$

КП

$$T_R = 18^{\text{h}}31^{\text{m}}40^{\text{s}}$$

$$R = 314^\circ 39' 12'' 10'' 08$$

$$T_H = 18^{\text{h}}31^{\text{m}}00^{\text{s}}$$

$$z'_{\text{изм}} - \frac{L - R}{2} = 45^\circ 20' 56''$$

$$u = +4^s \\ s = 18 \ 31 \ 04$$

$$\rho = +56 \\ z = 45^\circ 21' 52''$$

$$\rho_0 = 58,74'', \quad \gamma = 0,9758, \quad B = 0,9776, \quad \rho = \rho_0 \cdot \gamma \cdot B = 56,0''$$

Вычисление широты

$$\begin{array}{r} 90^\circ - z = 44^\circ 38' 08'' \\ \text{I} = +0 \ 20 \ 16 \\ \text{II} = \quad \quad 20 \\ \text{III} = \quad \quad -6 \\ \hline \varphi = 44^\circ 58' 38'' \end{array}$$

§ 101. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗЕНИТНЫМ РАССТОЯНИЯМ СОЛНЦА

1. Теоретические основы способа

Приближенные определения широты, долготы и азимута днем с помощью небольших переносных приборов обычно производят по наблюдениям Солнца. Принципиально указанные определения по Солнцу не отличаются от соответствующих определений по наблюдениям отдельных звезд.

В соответствии с выгоднейшими условиями для определения широты по измеренным зенитным расстояниям светил Солнце необходимо наблюдать в меридиане или в непосредственной близости от него. Если произвести измерение зенитного расстояния Солнца точно в момент его кульминации ($t_\odot = 0$), то широта пункта определится по известной формуле

$$\varphi = z_\odot + \delta_\odot,$$

где склонение Солнца δ_\odot интерполируется на момент местного истинного полдня.

Однако в самом меридиане можно произвести лишь одиночное визирование на Солнце, которое может сопровождаться большой случайной погрешностью и является, по существу, бесконтрольным. С целью ослабления влияния случайных погрешностей наблюдение Солнца в каждом приеме производится многократно, при двух положениях вертикального круга теодолита. В этом случае возникает задача редуцирования наблюдений Солнца, выполненных вне меридиана, на меридиан, либо вычисления широты для каждого наблюдения с известным часовым углом Солнца. Формулы для вычисления широты в последнем из указанных случаев наиболее просты и целесообразны.

Исходной является основная формула зенитальных способов — формула косинуса зенитного расстояния

$$\cos z_{\odot} = \sin \varphi \sin \delta_{\odot} + \cos \varphi \cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot}.$$

Если известны часовой угол t и склонение Солнца в момент измерения его зенитного расстояния z_{\odot} , то в данной формуле остается одно неизвестное — φ . Задача преобразования данной формулы состоит в том, чтобы найти определяемое значение φ через известные величины z_{\odot} , δ_{\odot} и t_{\odot} . С этой целью введем следующие обозначения:

$$\cos K \sin M = \sin \delta_{\odot}; \quad \cos K \cos M = \cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot}, \quad (13.6)$$

откуда неизвестные M и K определяются из равенств

$$\operatorname{tg} M = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\odot}}{\cos t_{\odot}}, \quad (13.7)$$

$$\cos K = \frac{\sin \delta_{\odot}}{\sin M}. \quad (13.8)$$

С принятыми обозначениями формула для $\cos z_{\odot}$ примет вид

$$\begin{aligned} \cos z_{\odot} &= \sin \varphi \cos K \sin M + \cos \varphi \cos K \cos M = \\ &= \cos K (\sin \varphi \sin M + \cos \varphi \cos M), \end{aligned}$$

или

$$\cos z_{\odot} = \cos K \cos (\varphi - M).$$

Подставив значение $\cos K$, получим

$$\cos z_{\odot} = \frac{\sin \delta_{\odot} \cos (\varphi - M)}{\sin M},$$

откуда

$$\cos (\varphi - M) = \frac{\cos z_{\odot} \sin M}{\sin \delta_{\odot}}.$$

Обозначим

$$\frac{\cos z_{\odot} \sin M}{\sin \delta_{\odot}} = \cos N, \quad (13.9)$$

тогда

$$\varphi = M + N, \quad (13.10)$$

где

$$\operatorname{tg} M = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\odot}}{\cos t_{\odot}}; \quad \cos N = \frac{\cos z_{\odot} \sin M}{\sin \delta_{\odot}}.$$

Вычисления широты по формулам (13.7), (13.9) и (13.10) производятся достаточно просто.

Истинное зенитное расстояние Солнца, с учетом влияния рефракции и суточного параллакса, вычисляется по формуле

$$z_{\odot} = z'_{\odot} + \rho - P, \quad (13.11)$$

где z'_{\odot} — зенитное расстояние, вычисленное по отсчетам вертикального лимба; ρ — рефракция; $P = P_0 \sin z'_{\odot}$ — параллакс, где горизонтальный параллакс $P \approx 9''$.

Часовой угол Солнца можно вычислять двояким образом.

По местному среднему времени

$$t_{\odot} = m + E = T_H + u_0 + E, \quad (13.12)$$

где T_H — момент по часам (хронометру) наблюдения Солнца; u_0 — поправка часов в момент T_H относительно местного среднего времени; E — уравнение времени $+ 12^{\text{h}}$, выбираемое из таблиц Солнца АЕ на момент $ET^{\text{h}} = (T_H + u_0 - \lambda + \Delta T)^{\text{h}}$; ΔT — приближенная разность эфемеридного и всемирного времени.

Поправка часов (хронометра) u'_0 относительно местного среднего времени определяется с известной долготой пункта из приема радиосигналов времени по формуле

$$u'_0 = \text{UT1} + \lambda - X \text{ в момент } X,$$

где UT1 — всемирное время среднего момента подачи радиосигналов времени; X — показание часов (хронометра) в этот момент.

Поправка часов (хронометра) в момент T_H наблюдения Солнца будет

$$u_0 = u'_0 + \omega (T_H - X)^{\text{h}}.$$

Если при наблюдениях использовался звездный хронометр, то его часовой ход относительно среднего времени будет примерно равен

$$\omega \approx -10^{\text{s}}.$$

По местному звездному времени

$$t_{\odot} = s - \alpha_{\odot} = T_H + u^* - \alpha_{\odot}, \quad (13.13)$$

где T_H — момент по часам (хронометру) наблюдения Солнца, u^* — поправка часов в момент T_H относительно местного звезд-

ного времени, α_{\odot} — прямое восхождение Солнца, выбираемое из таблиц АЕ на момент;

$$ET^h = (T_H + u^* - \lambda - S_0 + \Delta T)^h, \quad (13.14)$$

где S_0 — звездное время в среднюю гринвичскую полночь для даты наблюдений.

Поправка часов (хронометра) u^* относительно местного звездного времени определяется с известной долготой пункта из приема радиосигналов времени по формуле

$$u^{*'} = UT1 + \mu UT1 + S_0 + \lambda - X \text{ в момент } X,$$

где $UT1$ — всемирное время среднего момента подачи радиосигналов времени; X — показание часов (хронометра) в этот момент.

Поправка часов (хронометра) в момент T_H наблюдения Солнца будет

$$u^* = u^{*'} + \omega (T_H - X).$$

Если при наблюдениях использовался средний хронометр (часы), то его часовой ход относительно звездного времени примерно равен

$$\omega = +10^5.$$

При нахождении величин δ_{\odot} , α_{\odot} или E из таблиц Солнца для приближенных определений широты можно обойтись простым линейным интерполированием.

2. Наблюдения и вычисления

При наблюдениях Солнца на окуляр надевают стеклянный густой светофильтр. Перед началом наблюдения определяют место зенита теодолита.

Солнце наблюдают вблизи меридиана и желательно так, чтобы часть наблюдений была сделана до прохождения Солнцем меридиана, а часть — после прохождения. При этом влияние на широту погрешности в поправке часов будет минимальным.

Каждый прием наблюдения Солнца выполняется в следующем порядке:

визирование на верхний (нижний) край Солнца, отсчет по часам, отсчет по вертикальному лимбу КЛ (КП);

визирование на нижний (верхний) край Солнца, отсчет по часам, отсчет по вертикальному лимбу КЛ (КП);

перевод трубы через зенит;

визирование на нижний (верхний) край Солнца, отсчет по часам, отсчет по вертикальному лимбу КП (КЛ);

визирование на верхний (нижний) край Солнца, отсчет по часам, по вертикальному лимбу КП (КЛ).

При каждом визировании средняя вертикальная нить должна располагаться примерно по центру видимого диска Солнца.

Журнал наблюдений

Дата наблюдения 7 июля 1968 г. Теодолит У5. Хронометр звездный. Поправка хронометра $u^* = +2^m 50^s$ в $T_H = 7^h 03^m$. Долгота пункта $\lambda = 2^h 30^m$, место зенита $Mz = 359^\circ 59' 54''$, $i_C^\circ = +25,6^\circ$; $B = 748,5$ мм

Пр и е м I

Номер наведения	Наблюдаемый край	Время T	Отсчет по вертикальному лимбу	$z'_{\odot L, R} = L - Mz = Mz - R$ $z_{\odot L, R} = z'_{\odot L, R} + \rho - P$
		КЛ		
1		6 ^h 56 ^m 12 ^s	32° 44' 53"	
2		58 51	12 45	
		6 ^h 57 ^m 32 ^s	32° 28' 49"	$z'_{\odot L} = 32^\circ 28' 55''$ $\rho = +35$
		КП		
3		7 ^h 01 ^m 27 ^s	327° 47' 16"	$P = -5$ $z_{\odot L} = 32^\circ 29' 25''$
4		5 06	15 15	
		7 ^h 03 ^m 16 ^s	327° 31' 16"	$z'_{\odot R} = 32^\circ 28' 38''$ $+35''$ $-5''$
		$\rho_0 = 37,0$ $\gamma = 0,943$ $B = 0,985'$ $\rho = \rho_0 \gamma$ $B = +35''$		
		$\sin z'_{\odot} = 0,54$ $P = 9'' \cdot 0,54 = 5''$		$z_{\odot R} = 32^\circ 29' 08''$

Таблица 108

Вычисление широты

Действия	КЛ	КП	Действия	КЛ	КП
$T_H + u^*$	7 ^h 00 ^m 22 ^s	7 ^h 06 ^m 06 ^s	$\sec t_{\odot}$	1,000133	1,000038
λ	2 30	2 30	$\operatorname{tg} \delta_{\odot}$	0,416 783	0,416778
s_0	18 58	18 58	$\operatorname{tg} M$	0,416838	0,416794
UT1	9 ^h 32,4 ^m	9 ^h 38,1 ^m	$\cos z_{\odot}$	0,843483	0,843528
UT1 ^h	9,55 ^h	9,60 ^h	$\sin M$	0,384752	0,384716
α_{\odot}	7 ^h 04 ^m 06 ^s	7 ^h 04 ^m 06 ^s	$\operatorname{cosec} \delta_{\odot}$	2,599380	2,59947
δ_{\odot}	+22° 37' 32"	22° 37' 31"	$\cos N$	0,843582	0,843558
$t_{\odot} = T_H +$	-3 ^m 44 ^s	+2 ^m 00 ^s	N	32° 28' 47"	32° 28' 56"
+ $u^* - \alpha_{\odot}$			M	22 37 42	22 37 34
i_{\odot}°	-0° 56' 00"	+0° 30' 00"	Φ	55 06 29	55 06 30
z_{\odot}	32° 29' 25"	32° 29' 08"	$\Phi_{\text{ср}}$	55° 06' 30"	

Для учета влияния рефракции измеряют температуру и атмосферное давление. Для приближенного определения широты делают два-три приема измерения зенитного расстояния Солнца.

Форма журнала наблюдений и пример вычисления широты по зенитному расстоянию Солнца приведен в табл. 107 и 108.

§ 102. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВКИ ЧАСОВ И ДОЛГОТЫ ПУНКТА ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗЕНИТНЫМ РАССТОЯНИЯМ СОЛНЦА

Для определения поправки часов и долготы пункта Солнце необходимо наблюдать в первом вертикале или вблизи от него, т. е. в утренние или вечерние часы. Момент прохождения Солнца через первый вертикал по местному среднему времени вычисляют по приближенным формулам

$$\left. \begin{aligned} m' &= t'_{\odot} - E; \\ \cos t'_{\odot} &= \operatorname{tg} \delta_{\odot} \operatorname{ctg} \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (13.15)$$

где t'_{\odot} — часовой угол Солнца, вычисленный для момента его прохождения через первый вертикал; для утренних наблюдений $t_{\odot} = 24^{\text{h}} - t'_{\odot}$, для вечерних $t_{\odot} = t'_{\odot}$; E — уравнение времени + 12^{h} , выбираемое из Астрономического Ежегодника на дату наблюдений; δ_{\odot} — склонение Солнца, выбираемое из АЕ на дату наблюдений.

Практически Солнце можно начинать наблюдать за 1,5 ч до момента m' и заканчивать спустя 1,5 ч после момента m' .

Во избежание больших погрешностей рефракции не следует наблюдать Солнце на зенитных расстояниях, превышающих 80° .

Общий порядок наблюдений при определении долготы пункта следующий:

- прием радиосигналов времени,
- измерение зенитных расстояний Солнца,
- прием радиосигналов времени.

Принципиальная схема измерения зенитных расстояний Солнца здесь остается такой же, как и при определении широты, т. е. зенитное расстояние Солнца в каждом приеме измеряется при двух положениях вертикального круга (КЛ и КП); в каждом полуприеме производится наблюдение прохождения верхнего и нижнего края Солнца через среднюю горизонтальную нить; для каждого прохождения записываются показания часов (секундомера) и отсчет по вертикальному лимбу. Для учета влияния рефракции измеряются температура и атмосферное давление. Журнал наблюдений Солнца представлен в табл. 109.

Часовой угол Солнца в функции его зенитного расстояния вычисляется по формуле

$$\cos t_{\odot L, R} = \frac{\cos z_{\odot L, R} - \sin \varphi \sin \delta_{\odot}}{\cos \varphi \cos \delta_{\odot}}. \quad (13.16)$$

Журнал наблюдений

Пункт *Ивановка* $\varphi = 44^{\circ} 58' 40''$ Теодолит У-5 № 1217Хронометр звездный № 387 Наблюдатель *Герасимов А. П.*Выписка из обработки приемов радиосигналов
времени

6 июля 1965 г.

Первый прием радиосигналов

Второй прием радиосигналов

$$UT1' = 4^h 03^m 30,00^s$$

$$UT1'' = 6^h 03^m 30,00^s$$

$$X' = 1\ 58\ 00,75$$

$$X'' = 3\ 58\ 19,97$$

$$U' = +2^h 05^m 29,25^s$$

$$U'' = +2^h 05^m 10,03^s$$

$$U = \frac{U' + U''}{2} = +2^h 05^m 19,64^s \text{ в момент } X = \frac{X' + X''}{2} = 2^h 58^m 10^s$$

$$\omega^h = \frac{U'' - U'}{(X'' - X')} = \frac{10,03^s - 29,25^s}{2} = -9,610^s$$

Измерение зенитного расстояния Солнца

Прием I

$$Mz = 0^{\circ} 0'$$

$$i_C^{\circ} = +19,3^{\circ}$$

$$B = 742,6 \text{ мм}$$

Номер наведения	Наблюдаемый край	Время T	Отсчет по вертикальному лимбу	
			КЛ	
1		2 ^h 07 ^m 19 ^s	70° 52' 18"	$\rho_0 = 166''$ $\gamma = 0,9682$ $B = 1,9771$ $\rho_L = 2' 37''$
2		2 09 46	58 14	
		$T_L = 2^h 08^m 32,5^s$	$L = 70^{\circ} 55' 16''$ $\rho = +2\ 37$ $P = -8$	
			$z_{\odot L} = 70^{\circ} 57' 45''$	
			КП	
3		2 ^h 15 ^m 14 ^s	290° 32' 39"	$\rho_0 = 154''$
4		2 17 36	25 48	
		$T_R = 2^h 16^m 25,0^s$	$R = 290^{\circ} 29' 14''$ $z'_R = 69^{\circ} 30' 46''$ $\rho_R = +2\ 26$ $P = -8$	$\rho_R = \rho_0 \cdot \gamma \cdot B = 2' 26''$
			$z_{\odot R} = 69^{\circ} 33' 04''$	

Зенитное расстояние Солнца вычисляется соответственно для КЛ и КП по формулам

$$z_{\odot L} = L - M_z + \rho_L - P;$$

$$z_{\odot R} = M_z - R + \rho_R - P,$$

где $P = P_0 \sin z'_{\odot}$ — суточный параллакс Солнца; $P_0 \approx 9''$ — горизонтальный параллакс.

Для интерполирования склонения Солнца вычисляют момент эфемеридного времени ET , соответствующий моменту наблюдения Солнца

$$ET = T_H + U + \omega (T_H - X) + \Delta T,$$

где $U = UT1 - X$ — поправка хронометра (секундомера) в момент X , полученная из приема радиосигналов времени в системе всемирного времени; ΔT — поправка за переход от всемирного времени к эфемеридному (для 1965 г. поправка $\Delta T = +35,0^s$).

Со значением $ET = (ET)^h$, выраженным в часах, интерполированное значение склонения Солнца будет

$$\delta_{\odot} = \delta_{\odot_0} + v_{\delta} (ET)^h,$$

где δ_{\odot_0} — склонение Солнца на 0^h эфемеридного времени для даты наблюдений; v_{δ} — часовое изменение склонения Солнца на момент ET .

Поправка хронометра (секундомера) может быть вычислена относительно как среднего, так и звездного времени.

При вычислении поправки относительно среднего местного времени пользуются формулами

$$\left. \begin{aligned} m &= t_{\odot} - E; \\ u_0 &= m - T_H - \text{в момент } T_H, \end{aligned} \right\} \quad (13.17)$$

где T_H — показание хронометра (секундомера) в момент измерения зенитного расстояния Солнца; E — уравнение времени $+12^h$, выбирается из таблиц АЕ на момент эфемеридного времени ET .

Для вывода долготы пункта с поправкой часов, вычисленной в системе местного среднего времени, из приема радиосигналов времени обеих станций вычисляются:

поправки хронометра (секундомера) в системе всемирного времени

$$U' = UT 1' - X' \quad \text{в момент } X';$$

$$U'' = UT 1'' - X'' \quad \text{в момент } X'';$$

$$U = \frac{U' + U''}{2} \quad \text{в момент } X = \frac{X' + X''}{2};$$

часовой ход хронометра (секундомера) в системе среднего времени

$$\omega^h = \frac{U'' - U'}{(X'' - X')^h}.$$

Если при наблюдениях Солнца использовался звездный хронометр, то его часовой ход относительно среднего времени будет близок по величине $K - 10^s$.

Среднее значение поправки хронометра для каждого приема измерения зенитного расстояния Солнца

$$u_{T_H} = \frac{u_L + u_R}{2} \text{ в момент } T_H = \frac{T_L + T_R}{2}$$

с помощью часового хода приводят к среднему моменту X приема радиосигналов времени

$$u_X = u_{T_H} + \omega(X - T_H).$$

Долгота пункта для каждого приема наблюдений Солнца вычислится по формуле

$$\lambda'_i = u_{X_i} - U.$$

Среднее значение долготы из наблюдений n приемов вычисляется как среднее арифметическое

$$\lambda' = \frac{\sum \lambda'_i}{n}.$$

Для получения долготы пункта с точностью $0,5^s - 0,7^s$ достаточно произвести 2—3 приема измерения зенитного расстояния Солнца, замкнутых приемами радиосигналов времени.

Пример вычисления поправки часов относительно среднего местного времени и долготы пункта приведен в табл. 110.

При вычислении поправки часов относительно местного звездного времени пользуются следующими формулами:

$$\begin{aligned} s &= \alpha_{\odot} + t_{\odot}, \\ u^* &= s - T_H \text{ в момент } T_H. \end{aligned} \quad (13.18)$$

Прямое восхождение Солнца α_{\odot} интерполируют из таблиц Солнца АЕ на момент ET .

Часовое изменение прямого восхождения вычисляют по формуле

$$v_{\alpha} = 9,856^s - v_E.$$

Интерполирование значения прямого восхождения будет

$$\alpha = \alpha_0 + v_{\alpha}(ET)^h,$$

где α_0 — значение прямого восхождения для 0^h эфемеридного времени на дату наблюдений.

Момент ET находят таким же образом, как при интерполировании склонения Солнца и уравнения времени. Часовой угол Солнца t_{\odot} вычисляется точно так же, как и при вычислении поправки часов относительно местного среднего времени.

Интерполирование склонения Солнца и уравнения времени

Обозначение	КЛ	КП	Обозначение	КЛ	КП
T_H	2 ^h 08 ^m 32 ^s	2 ^h 16 ^m 25 ^s	δ_{\odot_0}	+21° 16' 39,7"	+21° 16' 39,7"
U	+2 05 20	+2 05 20	$v_{\delta} (ET)^h$	-1 46,6	-1 49,9
$\omega(T_H - X)$	+8	+7	δ_{\odot}	+21 14 53,1	+21 14 49,8
ΔT	+35	+35	E_0	11 ^h 54 ^m 01,4 ^s	11 ^h 54 ^m 01,4 ^s
ET	4 14 35	4 22 27	$v_E (ET)^h$	-0,9	-1,0
(ET) ^h	4,243 ^h	4,375 ^h	E	11 54 00,5	11 54 00,4
v_{δ}	-25,12"				
v_E	-0,219 ^s				

Вычисление поправки хронометра

$$\varphi = 44^{\circ} 58' 40'' \quad \sin \varphi = 0,706832 \quad \cos \varphi = 0,707381$$

Схема вычислений	КЛ	КП
1	2	3
z_{\odot}	70° 57' 45"	69° 33' 04"
δ_{\odot_0}	21 14 53	21 14 50
$\sin \delta_{\odot_0}$	0,362406	0,362393
$\cos \delta_{\odot_0}$	0,932020	0,923025
$\cos z_{\odot_0}$	0,326187	0,349372
$\sin \varphi \sin \delta_{\odot_0}$	0,256160	0,256151
$\cos z_{\odot} - \sin \varphi \sin \delta_{\odot}$	0,070027	0,093221
$\cos \varphi \cos \delta_{\odot}$	0,659293	0,659297
$\cos t_{\odot}$	0,106215	0,141394
t_{\odot}°	276° 05' 50"	278° 07' 43"
t_{\odot}^h	18 ^h 24 ^m 28,3 ^s	18 ^h 32 ^m 30,9 ^s
E	11 54 00,5	11 54 00,4
m	6 30 27,8	6 38 30,5
$T_{L,R}$	2 08 32,5	2 16 25,0
$u_{L,R}$	+4 21 55,3	+4 22 05,5
u_{T_H}	+4 ^h 22 ^m 00,4 ^s	в момент $T_H = 2^h 12^m 29^s$

Примечание. Разность между значениями поправки часов при КЛ и КП объясняется тем, что при вычислениях не было известно точное значение Мз.

Вычисление долготы пункта

$$u_{T_H} = +4^h 22^m 00,4^s$$

$$\omega(X - T_H) = -7,3$$

$$u_X = +4 21 53,1$$

$$U_X = +2 05 19,6$$

$$\lambda' = 2^h 16^m 33,5^s$$

Интерполирование прямого восхождения Солнца

$$v_{\alpha_{\odot}} = 9,856^s - v_E = 9,856^s - (-0,219) = +10,075^s$$

Схема вычислений	КЛ	КП
$\alpha_{\odot 0}$	7 ^h 44 ^m 24,0 ^s	7 ^h 44 ^m 24,0 ^s
$v_{\alpha_{\odot}} (ET)^h$	+42,7	44,1
α_{\odot}	7 45 06,7	7 45 08,1

Вычисление поправок хронометра¹

t_{\odot}	18 ^h 24 ^m 28,3 ^s	18 ^h 32 ^m 30,9 ^s
α_{\odot}	7 45 06,7	7 45 08,1
s	2 09 35,0	2 17 39,0
$T_{L,R}$	2 08 32,5	2 16 25,0
$u_{L,R}$	+1 02,5	+1 14,0
$u_{T_H}^*$	+1 ^m 08,2 ^s в момент $T_H = 2^h12^m29^s$	

Выписка из обработки приемов радиосигналов времени

17 июля 1965 г.

Первый прием радиосигналов

$$\begin{aligned} UT1' &= 4^h03^m30^s \\ UT1' + \mu UT1' &= 4^h04^m10,001^s \\ S_0 &= 19\ 38\ 25,445 \\ S' &= 23\ 42\ 35,45 \\ X' &= 1\ 58\ 00,75 \end{aligned}$$

$$U^{*'} = +21^h44^m34,70^s$$

Второй прием радиосигналов

$$\begin{aligned} UT1'' &= 6^h03^m30^s \\ UT1'' + \mu UT1'' &= 6^h04^m29,714^s \\ S_0 &= 19\ 38\ 25,445 \\ S'' &= 25\ 42\ 55,16 \\ X'' &= 3\ 58\ 19,97 \end{aligned}$$

$$U^{*''} = 21^h44^m35,19^s$$

$$U_X^* = \frac{U^{*'} + U^{*''}}{2} = 21^h44^m34,94^s \text{ в момент } X = 2^h58^m10^s$$

$$\omega = \frac{U^{*''} - U^{*'}}{(X'' - X')^n} = \frac{(35,19^s - 34,70^s)}{2} = +0,245^s$$

Вычисление долготы пункта

$$u_{T_H}^* = +1^m08,2^s$$

$$\omega (X - T_H) = +0,2$$

$$u_X^* = +1^m08,4^s$$

$$U_X^* = 21^h44^m34,9^s$$

$$\lambda' = 2^h16^m33,5^s$$

¹ Схема вычисления часового угла остается та же, что и при вычислении поправки относительно местного среднего времени. Поэтому воспользуемся уже готовыми значениями часовых углов и продолжим эту схему.

Для вычисления долготы пункта из приема радиосигналов времени вычисляют поправки хронометра относительно гринвичского звездного времени по формулам

$$U^{*'} = UT1' + \mu UT1' + S_0 - X',$$

$$U^{*''} = UT1'' + \mu UT1'' + S_0 - X'',$$

$$U^* = \frac{U^{*'} + U^{*''}}{2} \text{ в момент } X = \frac{X' + X''}{2}$$

и часовой ход хронометра относительно звездного времени

$$\omega^{*h} = \frac{U^{*''} - U^{*'}}{(X'' - X')^h}.$$

Далее вычисленную поправку часов $u_{T_H}^*$ для момента T_H из наблюдений Солнца с помощью часового хода ω^{*h} приводят к моменту $X = \frac{X' + X''}{2}$ по формуле

$$u_X^* = u_{T_H}^* + \omega (X - T_H).$$

Долгота пункта вычисляется по формуле

$$\lambda' = u_X^* - U_X^*.$$

Вычисление поправки хронометра относительно местного звездного времени и вычисление долготы пункта для того же примера ¹ приведено в табл. 111.

Как видно, получили тот же самый результат для долготы пункта, что и при вычислении поправки часов в системе местного среднего времени.

§ 103. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА НАПРАВЛЕНИЯ НА ЗЕМНОЙ ПРЕДМЕТ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЗЕНИТНЫМ РАССТОЯНИЯМ СВЕТИЛ

1. Теоретические основы способа

В этом способе одновременно с измерением зенитного расстояния светила измеряется горизонтальное направление на светило.

Если дополнительно к этому измерить горизонтальное направление на земной предмет, то по формуле

$$Q = M - N$$

вычисляется горизонтальный угол между светилом и предметом, а по формуле

$$a = A + Q$$

вычисляется азимут направления на земной предмет.

¹ Журнал наблюдений см. в табл. 109.

Азимут светила A вычисляется по измеренному зенитному расстоянию на основании известной формулы косинуса стороны параллактического треугольника

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos z + \cos \varphi \sin z \cos A_N. \quad (13.19)$$

Из этой формулы имеем

$$\cos A_N = \frac{\sin \delta - \sin \varphi \cos z}{\cos \varphi \sin z}; \quad (13.20)$$

для светила на Востоке азимут, отсчитанный от точки Севера, будет

$$A = A_N,$$

а для светила на Западе

$$A = 360^\circ - A_N.$$

Из выведенных формул следует, что для определения азимута направления на земной предмет по измеренным зенитным расстояниям светил не нужно точно знать время наблюдения светила.

Приближенно время нужно здесь знать лишь для того, чтобы выбрать с необходимой точностью видимое склонение светила на момент наблюдений. При наблюдениях звезд достаточно знать лишь дату наблюдений, чтобы обеспечить интерполирование склонения с погрешностью, не превышающей $1''$. При наблюдениях Солнца для интерполирования видимого склонения с той же погрешностью время необходимо знать с точностью $1-2^m$.

Для выяснения наивыгоднейших условий наблюдений продифференцируем формулу (13.19) по всем аргументам

$$\begin{aligned} \cos \delta \, d\delta &= (\cos \varphi \cos z - \sin \varphi \sin z \cos A) \, d\varphi - \\ &- (\sin \varphi \sin z - \cos \varphi \cos z \cos A) \, dz - \\ &- \cos \varphi \sin z \sin A \, dA_N. \end{aligned} \quad (13.21)$$

Из параллактического треугольника по формулам пяти элементов имеем

$$\cos \delta \cos t = \cos \varphi \cos z - \sin \varphi \sin z \cos A_N,$$

$$\cos \delta \cos q = \sin z \sin \varphi - \cos z \cos \varphi \cos A_N,$$

а по формуле синусов

$$\sin z \sin A_N = \cos \delta \sin t.$$

Подставив полученные выражения в формулу (13.21), получим

$$\begin{aligned} \cos \delta \, d\delta &= \cos \delta \cos t \, d\varphi - \cos \delta \cos q \, dz - \\ &- \cos \delta \cos \varphi \sin t \, dA_N, \end{aligned}$$

откуда

$$\Delta A_N = \frac{\Delta \varphi}{\cos \varphi \operatorname{tg} t} - \frac{\cos q}{\cos \varphi \sin t} \Delta z - \frac{\Delta \delta}{\cos \varphi \sin t}. \quad (13.22)$$

Из формулы (13.22) следует:

при определении азимута по измеренным зенитным расстояниям светил влияние погрешностей $\Delta\varphi$, Δz и $\Delta\delta$ возрастает пропорционально $\sec \varphi$;

погрешность Δz измеренного зенитного расстояния оказывает наименьшее влияние на точность определяемого азимута при наблюдениях светил в элонгации ($\cos q = 0$); для элонгации достаточно велики $\operatorname{tg} t$ и $\sin t$, а поэтому влияние погрешностей $\Delta\varphi$ и $\Delta\delta$ будет небольшим; при наблюдениях же светила в восточной и западной элонгации влияние указанных погрешностей полностью исключается; однако следует иметь в виду, что в высоких широтах зенитные расстояния светил в элонгации малы, вследствие чего точность измерения горизонтальных направлений на светила будет невысокой;

для светил, у которых $\delta < \varphi$ (не имеющих элонгации на данной широте), выгоднейшими условиями для определения азимута являются наблюдения их вблизи первого вертикала, где значения часовых углов t близки к 90° ; при этом влияние погрешностей Δz , $\Delta\varphi$ и $\Delta\delta$ будет наименьшим.

Необходимо заметить, что при определении азимута по измеренным зенитным расстояниям светил приходится производить визирование на светило одновременно горизонтальной и вертикальной нитями, т. е. перекрестием нитей. Точность такого визирования на подвижный объект будет, естественно, невысокой. Кроме того, на точность измерения зенитных расстояний светил оказывают существенное влияние погрешности рефракции и гнупия трубы теодолита. Поэтому определение точных азимутов по измеренным зенитным расстояниям светил, как правило, не производят.

Для определения же приближенных азимутов с точностью 5—10" и грубее данный способ обладает тем преимуществом, что здесь не нужно точно знать времени наблюдения светил.

При наблюдениях звезд достаточно знать лишь дату наблюдений, а при наблюдениях Солнца или планет можно пользоваться обыкновенными часами, поправка которых известна с погрешностью 1—2^м.

2. Определение азимута направления по измеренным зенитным расстояниям звезд

Для наблюдений выбираются яркие звезды вблизи первого вертикала на зенитных расстояниях от 40 до 70°. Звезды выбираются визуально. Если наблюдатель не знаком со звездным небом, то последующее опознавание ярких отнаблюденных звезд производится уверенно с помощью звездной карты и номограммы к ней (см. прил. 3 и 4). Для наблюдений днем необходимо заранее вычислить эфемериды ярких звезд; при этом подбор их и приближенный контроль вычислений осуществляется с помощью той же карты и номограммы.

Перед наблюдениями проверяются и, если нужно, исправляются место зенита и коллимационная ошибка теодолита, а также

Журнал определения азимута по зенитным расстояниям ярких звезд

Пункт *Песчанка* $\varphi = 62^{\circ} 28' 55''$ Направление *Песчанка—Ильино*

Теодолит ОТ-02 № 10230

Дата 15.7.1970 г. $t = +9,5^{\circ}$, $B = 757$ мм

Прием 2

Звезда $\alpha\beta 00$ (№ 345), на западе

Объект наблюдений	Вертикальный лимб	Горизонтальный лимб	Примечание
п. Ильино	КП		$M = 26^{\circ} 21' 30,3''$ $N = 270 06 29,0$
	$206^{\circ} 20' 47,2^{\circ}$ 47,4		
	$206^{\circ} 21' 34,6''$		$Q = 116^{\circ} 15' 01,3''$
Звезда	$79^{\circ} 00' 26,1^{\circ}$ 26,0	$89^{\circ} 52' 56,1^{\circ}$ 56,3	$z' = \text{КП} - \text{КЛ} + 90^{\circ} =$ $= 68^{\circ} 06' 41,3''$ $\rho = 2' 23,4''$ $z = 68^{\circ} 09' 04''$
	$79^{\circ} 00' 52,1''$	$89^{\circ} 53' 52,4''$	
Звезда	КЛ		
	$100^{\circ} 54' 05,5^{\circ}$ 05,3	$270^{\circ} 18' 32,6^{\circ}$ 32,9	
	$100^{\circ} 54' 10,8''$	$270^{\circ} 19' 05,5''$	$\rho_0 = 2' 23''$ $\gamma = 1,0017$
п. Ильино	$26^{\circ} 20' 43,1^{\circ}$ 42,9		$B = 0,9961$
	$26^{\circ} 21' 26,0''$		$\rho = \rho_0 \gamma B = 2' 23,4''$

Вычисление азимута по z звездНаправление *Песчанка—Ильино*Дата 15.7.1970 г. $\varphi = 63^{\circ} 28' 55''$ $\sin \varphi = 0,894794$ $\cos \varphi = 0,446480$

Действия	Номер звезды	Действия	Номер звезды
	$\alpha\beta 00$ (345)		$\alpha\beta 00$ (345)
z	$68^{\circ} 09' 04''$	$\sin \delta - \sin \varphi \cos z$	$-0,000988$
δ	$19 23 29$	$\cos \varphi \sin z$	$0,414408$
$\sin z$	$0,928168$	$\cos A_N$	$-0,002384$
$\cos z$	$0,372160$	A	$269^{\circ} 51' 48''$
$\sin \delta$	$0,332019$	Q	$116 15 01$
$\sin \varphi \cos z$	$0,333007$	a	$26^{\circ} 06' 49''$

правильность установки сетки нитей. Теодолит горизонтируется и ориентируется в меридиане нулем горизонтального лимба на Север.

При наблюдениях с оптическим теодолитом каждый прием определения азимута по зенитному расстоянию звезды включает следующие операции.

П р и к р у г е л е в о (право):

визирование средней вертикальной нитью на земной предмет; отсчеты горизонтального лимба;

наведение трубы на звезду; для облегчения визирования на движущееся светило одним из наводящих винтов удерживают изображение звезды на горизонтальной или вертикальной нити до тех пор, пока оно не коснется пересечения нитей, после чего вращение винта прекращают; отсчитывают по вертикальному и горизонтальному лимбам; перед отсчетом по вертикальному лимбу совмещают изображения концов пузырька контактного уровня.

П р и к р у г е п р а в о (лево):

наведение трубы на звезду так же, как при первом положении теодолита; отсчеты по вертикальному и горизонтальному лимбам;

визирование на местный предмет; отсчеты горизонтального лимба.

Для учета рефракции определяют температуру и атмосферное давление. Для определения азимута со средней квадратической погрешностью 5—7" достаточно произвести наблюдения по приведенной программе 4—6 приемами, причем одну половину звезд следует наблюдать на востоке, а другую — на западе.

Пример журнала наблюдений и вычисление азимута по зенитному расстоянию звезды приведен в табл. 112 и 113.

3. Определение азимута направления по измеренному зенитному расстоянию Солнца

Азимут направления по зенитному расстоянию Солнца определяется в утренние и вечерние часы при высоте Солнца не менее 10°.

Для наблюдений Солнца необходимо иметь часы, поправка которых относительно декретного времени данного пояса должна быть известна с погрешностью, не превышающей 2^m. Наблюдение Солнца в каждом приеме выполняется в следующем порядке.

П р и к р у г е л е в о (право):

наведение трубы на земной предмет; запись отсчетов по горизонтальному лимбу;



наведение трубы на Солнце; запись отсчетов по часам (до целых минут), по вертикальному и горизонтальному лимбам.

П р и к р у г е п р а в о (лево):

наведение трубы на Солнце; запись отсчетов по часам, по вертикальному и горизонтальному лимбам;

наведение трубы на земной предмет; запись отсчетов по горизонтальному лимбу.

Журнал определения азимута по z Солнца
 Направление *Ивановка—Дятлово*
 Теодолит Theo 010 № 0319 Дата 16 июля 1965 г.
 $t_C^\circ = +28,8^\circ$; $B = 745,2$ мм

Объект наблюдений	Время	Вертикальный лимб	Горизонтальный лимб	Примечание
КЛ				
пос. Дятлово			$20^\circ 09' 29'' 30''$ 30	$M = 20^\circ 09' 09''$ $N = 301 \ 19 \ 42$
Солнце 	$18^h 11^m$	$68^\circ 17' 24'' 25''$ 26	$301^\circ 06' 40'' 40''$ 40	$Q = 78^\circ 49' 27''$ $z_\odot = 69^\circ 04' 04''$
КП				
Солнце 	$18^h 18^m$	$290^\circ 09' 15'' 16''$ 17	$121^\circ 32' 42'' 44''$ 45	$\rho = +2' 18''$ $P = -8''$ $z_\odot = 69^\circ 06' 14''$ $\rho_0 = 150''$ $\gamma = 0,9376$ $B = 0,9805$
пос. Дятлово	$T_H = 18^h 14^m$ $N = 2$		$200^\circ 08' 47'' 48''$ 50	$\rho = \rho_0 \gamma B =$ $= 2' 18''$

Вычисление азимута по z Солнца
 Направление *Ивановка—Дятлово*
 Дата 16 июля 1965 г. $\varphi = 44^\circ 58' 40''$; $N = 2$, $\sin \varphi = 0,706832$, $\cos \varphi = 0,707381$

Действия	Номер приема		Действия	Номер приема	
	Прием I			Прием I	
$T_H = T_{N+1}$	$18^h 14^m$		$\sin z_\odot$	0,934229	
$N+1$	3 00		$\cos z_\odot$	0,356665	
UT1	15 14		$\sin \delta_\odot$	0,363875	
(ET) ^h	$15,233^h$		$\sin \varphi \cos z_\odot$	0,252102	
v_δ	$-24,44''$		$\sin \delta_\odot - \sin \varphi \cos z_\odot$	0,111773	
δ_{\odot_0}	$+21^\circ 26' 30''$		$\cos \varphi \sin z_\odot$	0,660856	
$v_{\delta \cdot} (ET)^h$	$-6 \ 12$		$\cos A_N$	0,169134	
δ_\odot	21 20 18		A	$279^\circ 44' 15''$	
z_\odot	69 06 14		Q	78 49 27	
			a	$358^\circ 33' 42''$	

Наблюдения Солнца производятся со светофильтром. После того как изображение Солнца попало в поле зрения трубы, горизонтальная нить сетки подводится наводящим винтом трубы к верхнему или к нижнему краю диска Солнца. Вращением наводящего винта край диска Солнца удерживается на этой нити до тех пор, пока изображение бокового края диска Солнца не коснется вертикальной нити. В момент касания берутся и записываются в журнал отсчеты по часам, вертикальному и горизонтальному лимбам теодолита.

При КЛ и КП изображение диска Солнца наблюдается в противоположных углах сетки нитей трубы. В этом случае средние из отсчетов по вертикальному и горизонтальному лимбам будут отнесены к центру Солнца.

Зенитное расстояние Солнца исправляется поправками за рефракцию и за суточный параллакс, т. е.

$$z_{\odot} = z'_{\odot} + \rho - P,$$

где

$$P = 9'' \sin z'_{\odot}.$$

Склонение Солнца интерполируется на момент всемирного времени $UT1 = T_{N+1} - (N + 1)$. Для приближенного интерполирования можно положить $(ET)^h \approx (UT1)^h$ и $\delta_{\odot} = \delta_{\odot_0} + v_{\delta} (ET)^h$.

Журнал наблюдений и пример вычисления азимута по измеренному зенитному расстоянию Солнца приведен в табл. 114 и 115.

**ПРИБЛИЖЕННЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА, ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ
АЗИМУТАЛЬНЫМИ СПОСОБАМИ**

**§ 104. ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ
АЗИМУТА, ШИРОТЫ И ДОЛГОТЫ ПО ИЗМЕРЕННЫМ
ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ УГЛАМ
МЕЖДУ СВЕТИЛАМИ И МЕСТНЫМ ПРЕДМЕТОМ**

Для совместных определений азимута, широты и долготы по измеренным горизонтальным углам между светилами и местным предметом, в соответствии с выгоднейшими условиями наблюдений, выведенными в главе 9, светила необходимо наблюдать на среднем зенитном расстоянии $z_{cp} = 35^\circ$ ($20^\circ < z < 50^\circ$) при равномерном их расположении по азимутам или вблизи плоскостей двух произвольных взаимно перпендикулярных вертикалов, симметрично относительно зенита. При наблюдениях светил в разных вертикалах выбор их производится визуально, как для наблюдений способом Сомнера.

При наблюдениях светил вблизи плоскостей взаимно перпендикулярных вертикалов наиболее целесообразными вертикалами являются меридиан и первый вертикал, так как в этом случае существенно упрощается составление эфемерид звезд. Каждую звезду здесь можно наблюдать многократно, двумя-тремя приемами.

В том случае, когда на пункте необходимо определить все три элемента — азимут, широту и долготу, — данный способ является наиболее эффективным как по затратам времени, так и по точности получаемых результатов.

Для определений азимута, широты и долготы с погрешностями 3—5" и грубее для наблюдений можно применять оптические теодолиты и двухстрелочные секундомеры.

Общий порядок наблюдений в этом способе следующий:

прием радиосигналов времени;
измерение горизонтальных углов между светилами и местным предметом;
прием радиосигналов времени.

При наблюдениях с двухстрелочным секундомером прием радиосигналов времени производят не реже чем через 1—1,5 ч. Для определения азимута широты и долготы с указанной выше точностью следует произвести наблюдения 8—10 звезд.

Каждый прием измерения горизонтального угла между светлом и местным предметом с помощью оптического теодолита включает следующие операции.

При круге лево (право):

визирование на местный предмет средней вертикальной нитью трубы; отсчеты горизонтального лимба;

наведение трубы на светило (установка трубы по эфемеридам); как только звезда появилась в поле зрения трубы, ее изображение подводят к вертикальным нитям сетки; отсчитывают накладной на горизонтальную ось уровень; наблюдают прохождение звезды через три вертикальные нити сетки¹ с помощью двухстрелочного секундомера методом «глаз—клавиша»; записывают показания секундомера и горизонтального лимба; во время наблюдений прохождение звезд наводящим винтом трубы изображение звезды удерживают вблизи средней горизонтальной нити; отсчитывают вертикальный лимб (с точностью до 1').

При круге право (лево):

наблюдают звезду точно так же, как при первом положении прибора; при этом для быстрого отыскания звезды поворачивают верхнюю часть теодолита на 180° с учетом небольшого упреждения по азимуту (10—15'), трубу теодолита ставят на отсчет вертикального лимба 360° — z_1 , где z_1 — отсчет при первом положении теодолита;

визирование на местный предмет; отсчеты горизонтального лимба.

Пример журнала наблюдений с помощью оптического теодолита и двухстрелочного секундомера приведен в табл. 116.

Обработка результатов наблюдений включает:

вычисление поправки и хода хронометра (секундомера) из приемов радиосигналов времени;

обработку журнала наблюдений;

вычисление свободных членов и коэффициентов уравнений поправок;

составление и решение нормальных уравнений;

вывод уравненных значений геодезического азимута и составляющих уклонения отвесной линии (широты и долготы пункта); оценку точности.

Поправка и ход секундомера определяются из приема сигналов времени с условной долготой пункта λ_0 точно так же, как указано в главе 13.

Обработка журнала наблюдений включает:

вычисление горизонтального направления на местный предмет

$$M = \frac{L_{\Delta} + (R_{\Delta} \pm 180^{\circ})}{2};$$

¹ Если сетка нитей имеет только одну вертикальную нить, то в этом случае наблюдается три последовательных прохождения звезды через эту нить с соответствующими перестановками верхней части прибора по азимуту и отсчетам горизонтального лимба для каждой установки.

Журнал совместного определения азимута, широты и долготы

Пункт *Ивановка* $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40''$, $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,5^s$ Теодолит Theo 010 № 0319; $\frac{\tau}{2} = 5,12''$ Секундомер № 023437Дата 13 июля 1975 г. $u_0 = +1^m 22,21^s$ $X = 15^h 44,3^m$ П р и е м 6
Звезда $\alpha\beta$ 00 (№ 345)

Объект наблюдений	Время	Уровень, вертикальный лимб	Горизонтальный лимб	Примечание
КЛ				
п. Дерновка	59,7 ^s 17,4	6,2—42,2	135° 03' 20" 20,0" 20	$M = 135^\circ 03' 23,0''$ $N = 51^\circ 51' 08,8''$ $Q = 83^\circ 12' 14,2''$
Звезда	17 ^h 09 ^m 35,3 $T_L = 17^h 09^m 17,47^s$		44° 57'	
КП				
Звезда	15,3 33,2 17 ^h 12 ^m 51,0 ^s $T_R = 17^h 12^m 33,17^s$ $T_H = 17\ 10\ 55,32$ $\Delta T = 1^m 37,9^s$	42,3—6,2 314° 57' $b^{\partial/2} = +0,5$ $z = 45^\circ 00'$	232° 14' 23" 23,0" 23 315° 03' 25" 26,0" 27	$N' = 51^\circ 51' 08,5''$ $\Delta N_b = +0,3''$ $N = 51^\circ 51' 08,8''$ $\left(\frac{\Delta T}{100}\right)^2 = 0,96$ $5,454 \left(\frac{\Delta T}{100}\right)^2 = 5,2''$
п. Дерновка		$\text{ctg } z = 1,000$		

вычисление зенитного расстояния светила

$$z = \frac{L_b - R_b}{2} + \rho;$$

вычисление горизонтального направления на светило

$$N = \frac{L^* + (R^* \pm 180^\circ)}{2} + \Delta N_b,$$

где ΔN_b — поправка за наклон горизонтальной оси, вычисляемая по формуле

$$\Delta N_b = b^{\partial/2} \frac{\tau}{2} \text{ctg } z, \quad b^{\partial/2} = \frac{(\Pi + \Pi)_0 -_0 (\Pi + \Pi)}{2};$$

вычисление горизонтального угла $Q = M - N$ между светилом и местным предметом;

вычисление среднего момента наблюдения светила в приеме

$$T_H = \frac{T_L + T_R}{2};$$

вычисление величин

$$\Delta T = T_H - T_L = T_R - T_H \text{ и } 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2$$

для последующего учета поправки азимута за ускорение движения светила.

Свободные члены уравнений поправок вычисляются по формуле

$$l_i = [a_0 - (A_{0i} + \Delta A_{W_i})] - Q_i,$$

где a_0 — предварительное значение азимута направления на местный предмет; Q_i — горизонтальный угол между светилом и местным предметом; A_{0i} — условный азимут светила, вычисляемый с условными координатами пункта φ_0 и λ_0 по формуле

$$\text{ctg } A'_{0i} = \sin \varphi_0 \text{ctg } t_{0i} - \cos \varphi_0 \text{tg } \delta_i \text{cosec } t_{0i},$$

$$t_{0i} = T_{H_i} + u_0 + \omega (T_{H_i} - X) - \alpha_i;$$

$\Delta A_{W_i} = 5,454 \left(\frac{d^2 A}{dt^2} \right)_i \left(\frac{\Delta T_i}{100} \right)^2$ — поправка азимута за ускорение движения светила.

Значение $\frac{d^2 A}{dt^2}$ вычисляется по формуле $\left(\frac{d^2 A}{dt^2} \right) = k_{1i} \sin A_{0i} - k_{2i} \sin 2A_{0i}$, в которой k_{1i} и k_{2i} выбираются из таблиц прил. 2 по аргументам φ_0 и z_i .

Коэффициенты уравнений поправок вычисляются на основании известных выражений

$$b_i = -\sin A_{0i} \text{ctg } z_i; \quad c_i = \cos A_{0i} \text{ctg } z_i.$$

Для каждого светила составляется уравнение поправок вида (9.39)

$$\Delta a' + b_i x + c_i y + l_i = v_i \quad \text{с весом } P'_i = \sin^2 z_i.$$

Вычисления свободных членов уравнений поправок, составление и решение системы уравнений поправок вида (9.39) по методу наименьших квадратов, вывод значений определяемых величин и оценку точности производят принципиально так же, как это показано в § 68.

**§ 105. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО АЗИМУТА
ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ СВЕТИЛ В РАЗНЫХ ВЕРТИКАЛАХ**

Выгоднейшие условия определения азимута из наблюдений звезд в разных вертикалах отличаются от выгоднейших условий совместного определения азимута, широты и долготы только выбором светил по зенитным расстояниям. Если для совместных определений светила выбираются на средних ($20^\circ < z < 50^\circ$) зенитных расстояниях, то для определения азимута их нужно выбирать на больших ($50^\circ < z < 80^\circ$) зенитных расстояниях. Общий порядок наблюдений и порядок измерения горизонтального угла между светилом и местным предметом в каждом приеме остаются такими же, как при совместных определениях. За счет увеличения зенитных расстояний светил существенно повышается точность измерения горизонтальных направлений на светила и тем самым повышается вес урванного значения азимута. Точность же определения составляющих уклонения отвесной линии (широты и долготы пункта) при наблюдениях светил на больших зенитных расстояниях резко снижается и не может удовлетворять требованиям совместного определения указанных величин.

Пример определения геодезического азимута из наблюдений звезд в разных вертикалах приведен в табл. 117 и 118.

Т а б л и ц а 117

**Определение геодезического азимута направления
с пункта Ивановка на пункт Дерновка из наблюдений звезд
в разных вертикалах**

Теодолит Theo 010 № 0319 Двухстрелочный секундомер № 023437

Условные координаты пункта *Ивановка* $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40''$,

$\lambda_0 = 3^h 16^m 34,50^s$

Дата 14 июля 1975 г.

У р а в н е н и я п о п р а в о к

$a_0 = 333^\circ 16' 40''$

Номер звезды	Зенитное расстояние	Вес P_t	a	b	c	l	s
482	59° 36'	0,74	+1	-0,20	-0,55	+3,7"	+3,95
413	61 23	0,77	1	-0,54	-0,11	+2,0	+2,35
14	67 38	0,85	1	+0,35	-0,21	+5,7	+6,84
558	67 32	0,85	1	+0,14	-0,39	+7,9	+8,65
666	71 34	0,90	1	-0,33	+0,05	+0,2	+0,92
365	62 16	0,78	1	-0,41	+0,33	-1,5	-0,58
318	61 46	0,78	1	+0,25	+0,47	-1,4	+0,32
246	68 43	0,87	1	+0,38	+0,10	-1,2	+0,28

Нормальные уравнения

	$a]$	$b]$	$c]$	$l]$	$s]$
$[Pa]$	+6,52	-0,24	-0,25	+12,71	+18,74
$[Pb]$		+0,77	+0,02	+1,01	+1,56
$[Pc]$			+0,66	-6,27	-5,84
$[Pl]$				+98,11	+105,56

Из решения нормальных уравнений получены следующие данные:

$$\Delta a' = -1,7'', \quad x = -2,1'', \quad y = +8,9'', \quad [Pv^2] = 18,68$$

$$\mu = 1,9'', \quad P_{a'} = 6,52.$$

Условный азимут $a' = a_0 + \Delta a' = 333^\circ 16' 38,3''$; $m_{a'} = 0,8''$.

Геодезический азимут $a_r = a' - 15 (\lambda_0 - L) \sin \varphi_0 = 333^\circ 16' 46,8''$;
 $m_{a_r} = 0,8''$.

Журнал наблюдений и вычисление свободных членов уравнений поправок здесь не приводятся, так как они остаются такими же, как при совместных определениях (см. предыдущий параграф).

Вычисление азимута по приближенным формулам

Приведенная схема вычисления геодезического азимута с составлением и решением уравнений поправок по методу наименьших квадратов является совершенно строгой в теоретическом отношении. Она, по существу, ничем не отличается от схемы вычисления точного геодезического азимута.

Для приближенных определений геодезического азимута, выполняемых с точностью 3—5" и грубее, при соблюдении условия равномерного распределения светил по азимутам или наблюдений их в плоскости любого произвольного вертикала равным числом по обе стороны от зенита схему вычисления геодезического азимута можно существенно упростить и обойтись без составления и решения уравнений поправок.

Действительно, из нормального уравнения

$$[P] \Delta a' + [Pb] x + [Pc] y + [Pl] = 0$$

получим следующее выражение для поправки $\Delta a'$ условного азимута

$$\Delta a' = - \frac{[Pl]}{[P]} - \frac{[Pb]}{[P]} x - \frac{[Pc]}{[P]} y.$$

При наблюдении светил на больших z сумма весов $[P] = [\sin^2 z]$ всегда достаточно велика; ее численное значение близко к числу наблюденных приемов.

Суммы

$$[Pb] = - [\cos z \sin A] = - \cos z_{\text{cp}} [\sin A] \text{ и } [Pc] = \cos z_{\text{cp}} [\cos A]$$

при более или менее равномерном расположении светил по азимутам и наблюдений их на больших z всегда достаточно малы.

Таким образом, для приближенных определений азимута можно положить

$$\Delta a' = - \frac{[Pl]}{[P]},$$

т. е. поправка $\Delta a'$ численно равна среднему весовому из значений свободных членов, взятых с обратным знаком.

Условный азимут направления вычисляется по формуле

$$a' = a_0 + \Delta a' = a_0 - \frac{[Pl]}{[P]}.$$

Геодезический азимут направления будет

$$a_r = a' - 15 (\lambda_0 - L) \sin B.$$

Если при вычислениях пользоваться не предварительными координатами пункта φ_0 и λ_0 , а геодезическими координатами B и L , то по результатам вычисления свободных членов сразу получим

$$\Delta a_r = - \frac{[Pl_r]}{[P]} \text{ и } a_r = a_0 + \Delta a_r.$$

Уравненное значение геодезического азимута исправляется поправками: Δc — за центрировку, Δr — за редукцию, $\Delta \gamma$ — за сближение меридианов, Δa — за азимутальную лично-инструментальную разность.

Средняя квадратическая погрешность определения геодезического азимута ориентирного направления с учетом погрешности геодезической долготы пункта вычисляется по приближенной формуле

$$m_{a_r} = \sqrt{\frac{[Pv^2]}{[P](n-1)} + m_L^2 \sin^2 B},$$

где

$$v_i = l_{\text{cp}} - l_i, \quad l_{\text{cp}} = \frac{[Pl]}{[P]};$$

n — число приемов; m_L — средняя квадратическая погрешность определения геодезической долготы пункта.

В качестве примера уравнивания геодезического азимута по приближенным формулам решим тот же пример определения азимута из наблюдений звезд в разных вертикалах (табл. 119).

**Вычисление геодезического азимута из наблюдений звезд
в разных вертикалах**

Направление *Ивановка—Дерновка*

Дата 14 июля 1975 г.

Теодолит Theo 010 № 0319

Двухстрелочный секундомер № 023437

Условные координаты пункта *Ивановка*: $\varphi_0 = 44^\circ 58' 40''$ $\lambda_0 = 3^h 16^m 34,5^s$
 $a_0 = 333^\circ 16' 40''$, $B = 44^\circ 58' 32,3''$, $L = 3^h 16^m 35,30^s$; $m_L = 0,005^s$

Номер звезды	z	P	v	v^2	
482	59° 36'	0,74	+3,7"	+1,8"	3,24
413	61 23	0,77	+2,0	+0,1	0,01
14	64 38	0,85	+5,7	+3,8	14,44
558	67 32	0,85	+7,9	+6,0	36,00
666	71 34	0,90	+0,2	-1,7	2,89
365	62 16	0,78	-1,5	-3,4	11,56
318	61 46	0,78	-1,4	-3,3	10,89
246	68 43	0,87	-1,2	-3,1	9,61

$$[P] = 6,54; [Pl] = +12,71''; [Pv] = +0,2''; [Pv^2] = 73,75; \frac{[Pl]}{[P]} = +1,9''$$

$$\text{Условный азимут } a' = a_0 - \frac{[Pl]}{[P]} = 333^\circ 16' 38,1''$$

$$\text{Геодезический азимут } a_r = a' - 15(\lambda_0 - L) \sin B = 333^\circ 16' 38,1'' + 8,5'' = 333^\circ 16' 46,6''$$

$$m_{a_r} = m_{a'} = \sqrt{\frac{73,75}{6,54 \times 7}} = 1,2''$$

**§ 106. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО АЗИМУТА
ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД В МЕРИДИАНЕ
С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ТЕОДОЛИТА
И ДВУХСТРЕЛОЧНОГО СЕКУНДОМЕРА**

Выше уже неоднократно упоминалось, что для определения геодезического азимута наблюдения звезд можно производить в плоскости любого произвольного вертикала на больших зенитных расстояниях равным числом по обе стороны от зенита. Меридиан удобен тем, что для наблюдений легко составляются эфемериды звезд, пользуясь средними местами любого звездного каталога, а также существенно упрощаются формулы для вычислений азимутов светил.

Для определения геодезического азимута направления на земной предмет с помощью оптического теодолита и двухстрелочного

секундомера с погрешностью 3—5" достаточно произвести наблюдения 6—8 звезд (6—8 приемов) в меридиане, замкнутых приемами радиосигналов времени.

Для наблюдений теодолит устанавливается на столбе или штативе, тщательно горизонтируется, диаметр горизонтального лимба 0—180° ориентируется в меридиане нулем на Север. Ориентирование теодолита производится по Полярной звезде, пользуясь таблицей высот и азимутов Полярной АЕ. Перед наблюдением выполняются необходимые поверки теодолита.

Каждый прием измерения горизонтального угла между местным предметом и светилом в момент его прохождения через меридиан выполняется в следующем порядке.

П р и к р у г е л е в о (право):

визирование на местный предмет средней вертикальной нитью за 4—5^м до эфемеридного момента s , отсчет горизонтального лимба;

установка трубы на зенитное расстояние звезды; установка верхней части теодолита в меридиане с учетом угла упреждения; для южных звезд величина угла упреждения делается 30—40', для северных — 20';

при появлении звезды в поле зрения трубы отсчитывается наклонной на горизонтальную ось уровень; наблюдения моментов прохождения звезды через три вертикальные нити сетки методом «глаз — клавиша», отсчет горизонтального лимба.

П р и к р у г е п р а в о (лево):

установка трубы на зенитное расстояние звезды; поворот верхней части теодолита на 180° с учетом угла упреждения по другую сторону от меридиана;

наблюдение звезды так же, как при первом положении теодолита;

визирование на местный предмет, отсчеты горизонтального лимба.

Пример журнала наблюдений приведен в табл. 120.

В ы ч и с л е н и я

Из обработки приема радиосигналов времени выводятся значения поправки секундомера u_T в момент X и часового хода ω в системе звездного времени.

В журнале наблюдений вычисляются (см. журнал в табл. 120): средние моменты наблюдения звезды в полуприеме и в приеме

$$T_{L, R} = \frac{\sum T_i}{3}; \quad T_H = \frac{T_L + T_R}{2};$$

наклон горизонтальной оси в полуделениях

$$b^{\partial/2} = \frac{(\Pi + \Pi)_0 - a(\Pi + \Pi)}{2}$$

Журнал определения геодезического азимута
из наблюдений звезд в меридиане

Дата 17 июля 1975 г.

Пункт *Ивановка* $\Upsilon B = 44^\circ 58' 32,3''$ $L = 3^h 16^m 35,30^s$ Направление *Ивановка—Дерновка*

Теодолит Theo 010 № 0319 Двухстрелочный секундомер № 023437

Прием 4 Звезда 681—S

 $s = 18^h 41^m$

$$z = 53^\circ 17,4'; \quad \frac{\tau}{2} = 5,12''; \quad \text{ctg } z = 0,7458; \quad -\frac{\tau}{2} \text{ctg } z = 3,82''$$

$$u_r = +1^m 32,89^s \quad X = 18^h 00,2^m; \quad \omega = +10,109^s$$

Объект наблюдений	Время T	Уровень	Горизонтальный лимб	Направления
КЛ				
п. Дерновка Звезда 681—S	43,5 ^s	7,0—43,0	333° 17' 23" 23,0"	333° 17' 23,0"
	07,7		23	
	18 ^h 37 ^m 31,7 ^s		179° 07' 23" 23,5"	$N' = 179^\circ 58' 59,5''$
	$T_L = 18^h 37^m 07,63^s$		24	$\Delta N_b = +5,7''$
				$N = 179^\circ 59' 05,2''$
КП				
Звезда № 681—S	16,5 ^s	44,5—8,5	0° 50' 35" 35,5"	
п. Дерновка	40,7	$b^{\partial/2} = +1,50$	36	
	18 43 04,7	$\Delta N_b = +5,7''$	153° 17' 32" 32,5"	153° 17' 32,5"
	$T_R = 18^h 42^m 40,63^s$		33	2с = —9,5"
	$T_H = 18^h 39^m 54,13^s$			$M = 333^\circ 17' 27,8''$
				$N = 179 59 05,2$
				$Q = 153^\circ 18' 22,6''$

и поправка горизонтального направления на звезду в секундах

$$\Delta N_b = b^{\partial/2} \frac{\tau}{2} \text{ctg } z;$$

средние отсчеты горизонтального лимба при наблюдениях местного предмета и звезды;

средние значения измеренных направлений в приеме при наблюдениях местного предмета

$$M = \frac{L_{\Delta} + (R_{\Delta} \pm 180^\circ)}{2}$$

и звезды

$$N = \frac{L^* + (R^* \pm 180^\circ)}{2} + \Delta N_b;$$

горизонтальный угол между звездой и местным предметом

$$Q = M - N;$$

двойная коллимационная ошибка из наблюдений местного предмета

$$2c = L_{\Delta} - (R_{\Delta} \pm 180^\circ).$$

Вычисление свободных членов уравнений поправок производится по следующим формулам:

$$l_i = (a_0 - A_{r_i}^*) - Q_i,$$

где a_0 — предварительное значение азимута направления на местный предмет; A_{r_i} — азимут светила, вычисленный с геодезическими координатами пункта по формулам:

для южной звезды

$$A_{r_s} = 15 t_{r_s} \cos \delta_s \operatorname{cosec} z_s \pm 180^\circ, z_s = B - \delta_s;$$

Т а б л и ц а 121

Вычисление свободных членов уравнений поправок

(для наблюдений звезд в меридиане)

Пункт *Ивановка* Направление *Ивановка—Дерновка*

Действия	Номер звезды	
	681—S	195—N
T_H	18 ^h 39 ^m 54,13 ^s	18 ^h 55 ^m 13,06 ^s
u_r	+1 32,89	+1 32,89
$\omega (T_H - X)$	+6,81	+9,31
s	18 41 33,83	18 56 55,26
α	18 41 38,93	6 54 55,72
t_r	—5,10	+1 59,54
$15t_r$	—76,5"	+17 93,1"
z	53° 17' 12"	57° 59' 55"
δ	—8 18 39,8	+77 01 32,5
$\sin z$	0,80164	0,84804
$\sec \delta$	1,01061	4,45407
$\sin z \sec \delta$	0,81015	3,77721
$A_r = \frac{15t}{\sin z \sec \delta}$	—1' 34,4"	+7' 54,7"
Q_i	(179° 58' 25,6")	333° 08' 45,0"
a_i	333 16 48,4	333 16 39,7
a_0	338 16 40,0	333 16 40,0
l_i	—8,2"	+0,3"

для северной звезды в нижней кульминации

$$A_{rN} = 15 (t_{rN} - 12^h) \cos \delta_N \operatorname{cosec} z_N,$$

где $t_{rS, N} = T_{H_{S, N}} + u_r + \omega (T_{H_{S, N}} - X) - \alpha_i$ — часовой угол южной (северной) звезды.

Пример вычисления свободных членов уравнений поправок приведен в табл. 121.

Уравнивание геодезического азимута направления на местный предмет производится по упрощенным формулам

$$\Delta a_r = - \frac{[Pl]}{[P]}; \quad a_r = a_0 + \Delta a_r.$$

Если вычисления производились не с геодезическими, а с условными координатами пункта φ_0 и λ_0 , то в результате уравнивания получают условный азимут направления

$$\Delta a' = - \frac{[Pl]}{[P]}; \quad a' = a_0 + \Delta a'.$$

Переход от условного к геодезическому азимуту направления в этом случае производится по формуле

$$a_r = a' - 15 (\lambda_0 - L) \sin B.$$

Т а б л и ц а 122

Уравнивание геодезического азимута
из наблюдений звезд в меридиане

Направление *Ивановка—Дерновка* Теодолит Theo 010 № 0319
 $a_0 = 333^\circ 16' 40''$, $B = 44^\circ 58' 32,3''$; $L = 3^h 16^m 35,30^s$, $m_L = 0,005^s$

Номер звезды	z	P	l	v	v^2
112	$74^\circ 22,0'$	0,93	$+2,0''$	$+2,5''$	6,25
134	$74 37,7$	0,93	$+1,3$	$+2,3$	5,29
421	$50 02,1$	0,59	$-2,7$	$-2,2$	4,84
681	$53 17,4$	0,64	$-8,2$	$-7,7$	59,29
195	$57 59,8$	0,72	$+0,3$	$+0,8$	0,64
471	$41 56,1$	0,45	$+1,7$	$+2,2$	4,84
		$[P]=4,26$	$[Pl]=-2,32''$	$[Pv]=-0,2''$	$[Pv^2]=54,17$

$$\frac{[Pl]}{[P]} = -0,54''; \quad a_r = 333^\circ 16' 40'' - (-0,5'') = 333^\circ 16' 40,5''$$

$$m_{a_r} = \sqrt{(0,08) \cdot 0,5 + \frac{54,17}{4,26(6-1)}} = 1,6''$$

Оценка точности производится по упрощенной формуле

$$m_{a_r} = \sqrt{\frac{[Pc^2]}{[P](n-1)} + m_L^2 \sin^2 B},$$

где

$$v_i = l_{cp} - l_i, \quad l_{cp} = \frac{[Pl]}{[P]}.$$

Пример уравнивания приведен в табл. 122.

**§ 107. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО АЗИМУТА
ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЗВЕЗД В ВЕРТИКАЛЕ
МЕСТНОГО ПРЕДМЕТА С ПОМОЩЬЮ
ОПТИЧЕСКОГО ТЕОДОЛИТА
И ДВУХСТРЕЛОЧНОГО СЕКУНДОМЕРА**

Непосредственное определение геодезического азимута направления из наблюдений звезд в вертикале земного предмета состоит в измерении часовых углов звезд в моменты пересечения ими вертикала земного предмета.

Отсчеты по горизонтальному лимбу при этом не производятся. Вследствие этого точность определения азимута данным способом должна быть принципиально выше, чем в способах, связанных с измерением горизонтальных углов между земным предметом и светилами.

Для наблюдений данным способом оптический теодолит должен быть снабжен специальной сеткой нитей (рис. 93), имеющей по три боковых вертикальных нити, расположенных симметрично относительно центральной нити.

Выбор звезд для наблюдений в вертикале земного предмета и составление рабочих эфемерид производится по звездной карте в Полярной стереографической проекции с помощью номограммы, построенной для данного пункта (прил. 3).

Для определения азимута звезды необходимо выбирать на больших зенитных расстояниях ($50^\circ < z < 80^\circ$) равным числом по обе стороны от зенита. Для определения геодезического азимута с погрешностью $3''$ достаточно произвести наблюдения 6—8 звезд в вертикале земного предмета. Наблюдения звезд замыкаются приемами радиосигналов точного времени, из которых определяют с геодезической (или условной) долготой пункта поправку

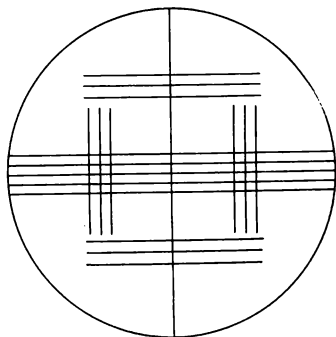


РИС. 93

секундомера и его часовой ход в системе местного звездного времени.

Наблюдения каждой звезды (каждого приема) выполняются в следующем порядке:

П р и к р у г е л е в о (право):

Земной предмет начинают наблюдать за 3—4 мин до эфемеридного момента s : наводят среднюю вертикальную нить сетки на земной предмет.

Затем наблюдают звезду: устанавливают зрительную трубу на эфемеридное зенитное расстояние z , ни в коем случае не сдвигая верхнюю часть теодолита по азимуту;

при появлении звезды в поле зрения трубы отсчитывают накладной на горизонтальную ось уровень; наводящим винтом трубы подводят изображение звезды к средней горизонтальной нити;

Т а б л и ц а 123

**Журнал определения азимута из наблюдений звезд
в вертикале земного предмета**

Пункт *Гороховский* Направление *Гороховский—Церковь*

Теодолит Theo 010 № 163222; $\frac{\tau}{2} = 5,07''$ Двухстрелочный
секундомер № 48154

Дата 26 апреля 1976 г. $a_0 = 119^\circ 16' 00''$

П р и е м 6 Звезда 233

$z = 39^\circ 50'$, $\text{ctg } z = 1,1988$; $\frac{\tau}{2} \text{ctg } z = 6,080''$

Уровень	Время T
КЛ	
7,0—43,4	47,6 ^s
${}_0(\text{Л} + \text{П}) = 50,4$	20,7
	<u>14^h45^m53,0^s</u>
	$T_L = 14^{\text{h}}45^{\text{m}}20,43^{\text{s}}$
КП	
42,3—5,9	09,2 ^s
$(\text{Л} + \text{П})_0 = 48,2$	40,8
$\delta^{\partial/2} = \frac{(\text{Л} + \text{П})_0 - {}_0(\text{Л} + \text{П})}{2} = -1,10$	<u>14^h51^m12,9^s</u>
$\Delta N_b = -6,7''$	$T_R = 14^{\text{h}}50^{\text{m}}40,97^{\text{s}}$
	$T_H = 14^{\text{h}}48^{\text{m}}00,70^{\text{s}}$
	<u>$\Delta T = 2^{\text{m}}40,27^{\text{s}} = 160,3^{\text{s}}$</u>
$Q = -\Delta N_b = +6,7''$	$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 14,01''$

наблюдают моменты прохождения звезды через три боковые нити с помощью двухстрелочного секундомера методом «глаз—клавиша».

При круге право (лево):

Наблюдают земной предмет, наводя среднюю вертикальную нить на земной предмет.

Звезду наблюдают на тех же боковых нитях сетки (после перевода трубы через зенит эти боковые нити будут располагаться по другую сторону от центральной нити) так же, как при первом положении теодолита.

Пример журнала наблюдений приведен в табл. 123.

Вычисления

Из обработки приема радиосигналов времени вычисляются поправки и ход секундомера в системе местного звездного времени. Поправки секундомера u_r вычисляются с геодезической долготой пункта L .

В журнале наблюдений вычисляются (см. табл. 123):

средние моменты наблюдения звезды в полуприемах T_L, T_R и в приеме

$$T_H = \frac{T_L + T_R}{2};$$

— разности $\Delta T = T_H - T_{L, R}$ и величины $5,454 \left(\frac{\Delta T}{100}\right)^2$ для последующего учета поправки азимута за ускорение; средний наклон горизонтальной оси в приеме

$$b^{\partial/2} = \frac{(I + \Pi)_0 - {}_0(I + \Pi)}{2}$$

и поправка

$$\Delta N_b = b^{\partial/2} \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z;$$

малый горизонтальный угол Q между светилом и местным предметом

$$Q = -\Delta N_b.$$

Вычисляются свободные члены уравнений поправок по формуле

$$l = a_0 - a_i,$$

где

$$a_i = A_{r_i} + \Delta A_{w_i} + Q_i.$$

Азимут светила вычисляется с геодезическими координатами пункта и средним моментом наблюдений:

$$\operatorname{ctg} A_r = \sin B \operatorname{ctg} t_r - \cos B \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t_r,$$

где

$$t_r = T_H + u_r + \omega (T_H - X) - \alpha.$$

Вычисление свободных членов уравнений поправок
для наблюдений звезд в вертикале местного предмета

Пункт *Гороховский* Направление *Гороховский—Церковь*
 $a_0 = 119^\circ 16' 00,0''$, $B = 55^\circ 45' 39,2''$, $L = 2^h 30^m 00,00^s$

$$\sin B = 0,826697, \quad \cos B = 0,562648$$

Обозначения	Номер приема	
	Прием 5	Прием 6
	Номер звезды	
	424	233
T_H	14 ^h 29 ^m 29,70 ^s	14 ^h 48 ^m 00,70 ^s
u_Γ	-10 51,80	-10 51,80
$\omega (T_H - X)$	+9,40	+10,80
s	14 18 47,30	14 37 19,70
α	17 33 22,20	8 56 53,80
t_Γ^h	20 45 25,10	5 40 25,90
t_Γ^0	311° 21' 16,5"	85° 06' 28,5"
δ	+12 34 45,7	+48 10 48,7
$\operatorname{tg} \delta$	0,223148	1,117662
$\operatorname{ctg} t$	-0,880211	0,08559
$\operatorname{cosec} t_\Gamma$	-1,332205	1,003657
$\sin B \operatorname{ctg} t_\Gamma$	-0,727668	0,070758
$\cos B \operatorname{tg} \delta \operatorname{cosec} t_\Gamma$	-0,167264	0,631150
$\operatorname{ctg} A_\Gamma$	-0,560404	-0,560392
A_Γ	119° 15' 59,2"	299° 15' 57,3"
ΔA_W	+2,3	+0,5
Q	+6,4	+6,7
a_1	119 16 07,9	299 16 04,5
a_0	119 16 00,0	119 16 00,0
l_i	-7,9"	-4,5"
$\sin A_\Gamma$	+0,8724	-0,8724
$\sin 2A_\Gamma$	-0,8530	-0,8530
$\cos A_\Gamma$	-0,4889	+0,4889

Поправка азимута светила за ускорение находится из выражения

$$\Delta A_W = 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 \frac{d^2 A}{dt^2},$$

где

$$\frac{d^2 A}{dt^2} = k_1 \sin A_\Gamma - k_2 \sin 2A_\Gamma;$$

величины k_1 и k_2 выбираются из таблиц прил. 2 по аргументам z и B .

Примеры вычисления свободных членов уравнений поправок приведены в табл. 124.

**Уравнивание геодезического азимута
из наблюдений звезд в вертикале местного предмета**

Направление *Гороховский—Церковь*

$$a_0 = 119^\circ 16' 00,0'', \quad B = 55^{\text{d}} 45' 39,2'', \quad L = 2^{\text{h}}30^{\text{m}}00,00^{\text{s}}$$

$$m_L = 0,005^{\text{s}}$$

Номер звезды	P	l	v	v^2
170	0,67	-7,2	-2,0	4,00
410	0,75	-3,8	+1,4	1,96
415	0,67	-2,6	+2,6	6,76
427	0,84	-5,4	-0,2	0,04
424	0,70	-7,9	-2,7	7,29
233	0,75	-4,5	+4,5	0,49
	$[P] = 4,38$	$[Pl] = -22,86''$	$[Pv] = -0,1$	$[Pv^2] = 14,18$

$$\frac{[Pl]}{[P]} = -5,2''$$

$$a_r = 119^\circ 16' 00,0'' - (-5,2'') = 119^\circ 16' 05,2''$$

$$m_{a_r} = \sqrt{(0,08)^2 \cdot 0,7 + \frac{14,18}{4,38 \times 5}} = 0,8''$$

Уравнивание геодезического азимута производится по приближенным формулам так же, как и в предыдущих способах.

Пример уравнивания геодезического азимута приведен в табл. 125.

**§ 108. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОГО АЗИМУТА
ПО ЧАСОВОМУ УГЛУ ПОЛЯРНОЙ**

Определение астрономического азимута по часовому углу Полярной с помощью среднего оптического теодолита может быть выполнено с погрешностью 3—5'' при условии тщательного исследования правильности вращения горизонтальной оси и учета соответствующей поправки горизонтального угла Q между Полярной и местным предметом за неправильную форму цапф.

Для определения астрономического азимута с указанной точностью астрономические координаты пункта можно знать приближенно со следующими значениями средних квадратических погрешностей

$$m_\psi = 10''; \quad m_\lambda = m_u = 1''.$$

φ	m_{a_r}	φ	m_{a_r}
45°	3,6"	65°	5,2"
50	3,8	70	6,2
55	4,2	75	8,0
60	4,6		

Однако на практике для целей ориентирования пользуются, как правило, геодезическим азимутом, связанным с астрономическим известным уравнением Лапласа

$$a_r = a - 15 (\lambda - L) \sin B$$

или

$$a_r = a - \eta \operatorname{tg} B.$$

На отдельные районы нашей страны составлены специальные схемы уклонений отвесных линий, по которым можно получить линейным интерполированием составляющие уклонения отвесной линии с погрешностью 2". Полагая погрешность определения астрономического азимута $m_a = 3''$ и $m_\eta = 2''$, получим при пользовании указанными схемами следующие значения погрешностей геодезического азимута для различных широт (табл. 126).

Как видно, с использованием схем уклонений отвесной линии нельзя определить геодезические азимуты с погрешностью 3". Определение геодезических азимутов с погрешностью 5" находится на пределе точности в средних широтах и далеко выходит за эти пределы в высоких широтах. Практически при пользовании данными схемами уклонений отвесных линий можно определить геодезические азимуты с погрешностью 10". Для определения же геодезических азимутов с погрешностью 3 и 5" необходимо знать астрономическую и геодезическую долготу пункта с погрешностями, не превышающими 0,07 и 0,1^s соответственно. Эти точности требуют большого объема работ по определению долгот пунктов.

Для определения астрономического азимута с погрешностью 3" необходимо выполнить шесть приемов измерения горизонтального угла Q между Полярной и местным предметом, а с погрешностью 5" — четыре приема.

Наблюдения азимута замыкаются приемом радиосигналов времени.

Каждый прием измерения горизонтального угла выполняется в следующем порядке.

П р и к р у г е л е в о :

наведение трубы на земной предмет, запись отсчетов по горизонтальному лимбу;

Журнал определения азимута по часовому углу Полярной

Пункт *Ивановка* $\varphi = 44^{\circ} 58' 37''$ $\lambda = 3^{\text{h}} 16^{\text{m}} 34,7^{\text{s}}$ Направление *Ивановка—Дерновка*

Теодолит Theo 010 № 0319 Двухстрелочный секундомер № 023437

Дата 22 июля 1975 г.

$$\frac{\tau}{2} = 5,123''; \quad u = +1^{\text{m}} 04,0^{\text{s}}; \quad X = 16^{\text{h}} 20,1^{\text{m}}; \quad \omega = +9,707^{\text{s}}$$

Пр и е м 2

$$z = 45^{\circ} 48', \quad \text{ctg } z = 0,972; \quad \frac{\tau}{2} \text{ ctg } z = 5,0''$$

Объект наблюдения	Время T	Уровень	Горизонтальный лимб	Примечание
КЛ				
п. Дерновка			$9^{\circ} 06' 23'' 23,0''$	$M = 9^{\circ} 06' 27,0''$
Полярная	$15^{\text{h}} 59^{\text{m}} 01,8^{\text{s}}$	$7,8-43,8$ $o(L+\Pi)_0 =$ $= 51,6$	$36^{\circ} 27' 43'' 43,0''$	$N' = 36^{\circ} 28' 23,0''$
				$\Delta N_b = +2,5$
				$N = 36^{\circ} 28' 25,5''$
КП				
Полярная	$16^{\text{h}} 03^{\text{m}} 09,8^{\text{s}}$	$44,3-8,3$ $(L+\Pi)_0 =$ $= 52,6$	$216^{\circ} 29' 03'' 03,0''$	$Q' = 332^{\circ} 38' 01,5''$
				$\Delta Q_{\text{ц}} = +0,9$
п. Дерновка	$T_H = 16^{\text{h}} 01^{\text{m}} 05,8^{\text{s}}$ $\Delta T = 2^{\text{m}} 04^{\text{s}} =$ $= 124^{\text{s}}$	$b^{\partial/2} = +0,5$ $\Delta N_b = +2,5''$	$189^{\circ} 06' 31'' 31,0''$	$Q = 332^{\circ} 38' 02,4''$
				$\Delta Q_{\text{ц}}$ взято из результатов исследования
				$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 8,4''$

наведение трубы на Полярную, запись отсчетов по часам (секундомеру), по уровню и по горизонтальному лимбу.

П р и к р у г е п р а в о:

наведение трубы на Полярную, запись отсчетов по часам (секундомеру), по уровню и по горизонтальному лимбу;

наведение трубы на местный предмет, запись отсчетов по горизонтальному лимбу.

Пример журнала наблюдений приведен в табл. 127.

В ы ч и с л е н и я

Поправки и ход часов (секундомера) из приемов радиосигналов времени вычисляются относительно местного звездного времени с астрономической долготой пункта λ .

В журнале наблюдений вычисляются (см. табл. 127):
средний момент наблюдения Полярной в приеме

$$T_H = \frac{T_L + T_R}{2};$$

разность $\Delta T = T_H - T_{L, R}$ и $5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2$;

средний наклон горизонтальной оси в приеме

$$b^{\partial/2} = \frac{(J + \Pi)_0 - o(J + \Pi)}{2};$$

поправка горизонтального направления на Полярную за наклон горизонтальной оси

$$\Delta N_b = b^{\partial/2} \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z,$$

где $z = 90^\circ - (\varphi + f)$; величина f выбирается из таблиц высот и азимутов Полярной АЕ, по аргументам φ и s ;

горизонтальное направление на местный предмет

$$M = \frac{L_{\Delta} + (R_{\Delta} \pm 180^\circ)}{2};$$

горизонтальное направление на Полярную

$$N = \frac{L^* + (R^* \pm 180^\circ)}{2} + \Delta N_b,$$

горизонтальный угол Q между Полярной и местным предметом

$$Q = M - N + \Delta Q,$$

где ΔQ — поправка горизонтального угла, выбираемая из результатов исследования правильности вращения горизонтальной оси.

Азимут направления на местный предмет вычисляется по следующим формулам:

азимут Полярной звезды, вычисленный со средним моментом наблюдения в приеме,

$$\operatorname{tg} A'_N = \frac{m \sin t}{n \cos t - 1},$$

где

$$m = \operatorname{ctg} \delta \sec \varphi; \quad n = \operatorname{ctg} \delta \operatorname{tg} \varphi;$$

$$t = T_H + u + \omega (T_H - X) - \alpha;$$

поправка азимута Полярной за ускорение

$$\Delta A_w = 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 \frac{d^2 A}{dt^2},$$

где $\frac{d^2A}{dt^2} = k_1 \sin A - k_2 \sin 2A$; k_1 и k_2 выбираются из таблиц прил. 2 по аргументам z и φ ;

азимут направления на земной предмет в приеме

$$a_i = A_{N_i} + Q_i,$$

где

$$A_{N_{L_i}} = A_{N_i} + \Delta A_{W_i};$$

средний азимут направления на земной предмет из n приемов

$$a = \frac{\sum a_i}{n};$$

геодезический азимут направления на земной предмет

$$a_r = a - 15 (\lambda - L) \sin B.$$

Оценка точности производится по формулам:

средняя квадратическая погрешность определения астрономического азимута (по внутренней сходимости результатов наблюдений)

$$m_a = \sqrt{\frac{[v^2]}{n(n-1)}};$$

средняя квадратическая погрешность геодезического азимута направления

$$m_{a_r} = \sqrt{m_a^2 + 15^2(m_\lambda^2 + m_L^2) \sin^2 B}.$$

Пример вычисления астрономического азимута направления для одного приема приведен в табл. 128.

Т а б л и ц а 128

Вычисление астрономического азимута направления по часовому углу Полярной

Направление *Ивановка—Дерновка*

Координаты п. *Ивановка* $\varphi = 44^\circ 58' 37,0''$ $\lambda = 3^h 16^m 34,7^s$
 $\operatorname{tg} \varphi = 0,99198,$ $\operatorname{sec} \varphi = 1,413646$

Действия	Номер приема		Действия	Номер приема	
	Прием № 2			Прием № 2	
T_H	16 ^h 01 ^m 05,8 ^s		$n = \operatorname{ctg} \delta \operatorname{tg} \varphi$	0,015725	
u	+1 04,0		$m \sin t$	-0,011354	
$\omega (T_H - X)$	-3,1		$n \cos t - 1$	-1,013523	
s	16 02 06,7		$\operatorname{tg} A'_N$	+0,011202	
α	1 59 22,1		A'_N	+0° 38' 30,4"	
t^h	14 02 44,6		ΔA_W	-0,1	
t^o	210° 41' 09,0"		Q	332° 38 02,4	
$\sin t$	-0,510330		a	333° 16' 32,7"	
$\cos t$	-0,859979		$\sin A'_N$	0,0120	
δ	89° 05' 54,0"		$\sin 2A'_N$	0,0224	
$\operatorname{ctg} \delta$	0,015738		$\frac{d^2A}{dt^2}$	-0,001	
$m = \operatorname{ctg} \delta \operatorname{sec} \varphi$	0,022248				

Уравнивание астрономического азимута
по часовому углу Полярной

Вычисление геодезического азимута

Направление *Ивановка—Дерновка*

$$\varphi = 44^{\circ} 58' 37,0'' \quad \lambda = 3^{\text{h}} 16^{\text{m}} 34,7^{\text{s}}$$

$$B = 44^{\circ} 58' 32,3'', \quad L = 3^{\text{h}} 16^{\text{m}} 35,3^{\text{s}}, \quad m_{\lambda} = 0,07^{\text{s}}, \quad m_L = 0,05^{\text{s}}$$

Номер приема	Значение азимута	v	Номер приема	Значение азимута	v
1	$333^{\circ} 16' 34,9''$	$+0,8''$	4	$33,6''$	$-0,5''$
2	$32,7$	$-1,4$	5	$32,4$	$-1,7$
3	$34,8$	$+0,7$	6	$36,0$	$+1,9$
				$a = 333^{\circ} 16' 34,1''$	$-0,2$ $[v^2] = 9,84$

Вывод среднего астрономического азимута и вычисление геодезического азимута направления Ивановка—Дерновка приводится в табл. 129.

$$m_a = \sqrt{\frac{9,84}{6 \times 5}} = 0,6''.$$

Геодезический азимут

$$a_r = a - 15 (\lambda - L) \sin B = 333^{\circ} 16' 34,1'' - 15 (-0,6) \cdot 0,707 = 333^{\circ} 16' 40,5'';$$

$$m_{a_r} = \sqrt{(0,6)^2 + 15^2 [(0,07)^2 + (0,05)^2 (0,707)^2]} = 1,1''.$$

Определение астрономического азимута по часовому углу Полярной с погрешностью $15''$ и грубее

При определениях азимута с погрешностью $15''$ и грубее можно несколько упростить формулы для вычислений. При тщательном горизонтировании теодолита можно не производить отсчетов по уровню. В остальном порядок определения остается таким же, как и при определении азимута с точностью $3-5''$.

Формулы для вычислений азимута Полярной получаются из решения параллактического треугольника $PZ\sigma$ (рис. 94) с некоторыми упрощениями. Опустим сферический перпендикуляр из вершины σ (в которой располагается

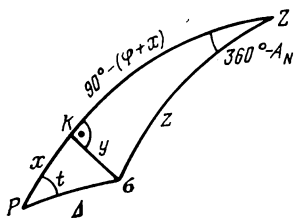


РИС. 94

Полярная) на сторону PZ . Прямоугольный треугольник $P\sigma k$ мал, так как его гипотенуза в настоящее время меньше 1° . Решим этот треугольник как плоский. При этом получим следующие выражения для его катетов:

$$x = \Delta \cos t; \quad y = \Delta \sin t.$$

Из сферического прямоугольного треугольника $Zk\sigma$ по первому правилу Модюи—Непера имеем

$$\cos(\varphi + x) = -\operatorname{tg} y \operatorname{ctg} A_N$$

или

$$\operatorname{tg} A_N = \operatorname{tg} y \sec(\varphi + x).$$

Раскладывая $\operatorname{tg} A_N$ и $\operatorname{tg} y$ в ряд, ограничиваясь по малости A_N и y первыми членами разложения, получим

$$A_N = -y \sec(\varphi + x).$$

Азимут направления на местный предмет будет

$$a = A_N + Q.$$

При определении астрономического азимута с погрешностью $15''$ (имея в виду, что последующий переход к геодезическому азимуту будет выполнен с помощью схем уклонений отвес-

Т а б л и ц а 130

Журнал определения азимута по часовому углу Полярной

Пункт *Щукино* $\varphi = 43^\circ 10' 00''$, $\lambda = 2^{\text{h}}40^{\text{m}}50^{\text{s}}$

Направление *Щукино—Юхнов*

Теодолит ТБ-1 № 825, $u = -1^{\text{m}}07^{\text{s}}$

Дата 11.8.1970 г.

П р и е м 2

Объект наблюдения	Время T	Горизонтальный лимб	Примечание
			КЛ
п. Юхнов		$0^\circ 03' 10'' 10''$ 10	$M = 0^\circ 03' 12''$ $N = 301^\circ 17' 16''$
Полярная	$2^{\text{h}}30^{\text{m}}10^{\text{s}}$	$301^\circ 15' 13'' 14''$ 15	$Q = 58^\circ 45' 56''$
			КП
Полярная	$2^{\text{h}}36^{\text{m}}30^{\text{s}}$	$121^\circ 19' 20'' 19''$ 18	$T'_M = 2^{\text{h}}33^{\text{m}}20^{\text{s}}$ $u = -1^{\text{m}}07^{\text{s}}$
п. Юхнов		$180^\circ 03' 14'' 14''$ 14	$T_M = 2^{\text{h}}31^{\text{m}}13^{\text{s}}$

Вычисление азимута по часовому углу Полярной

Направление *Щукино—Юхнов*

$$\alpha = 1^{\text{h}}57^{\text{m}}02^{\text{s}}, \quad \delta = 89^{\circ} 04' 27'', \quad \Delta = 55' 33''$$

T_M	2 ^h 32 ^m 13 ^s	y	—1938"
$-(N+1)$ $T_M - 3^{\text{h}}$ S_0	—3 ^h 23 ^h 32 ^m 13 ^s 21 17 53	$\sin t$ Δ $\cos t$	—0,58153 3333" 0,81352
$\mu (T_M - 3^{\text{h}})$ λ	+3 52 2 40 50	x φ	2712" = 45' 12" 43° 10' 00"
s α	23 34 48 1 57 02	$\varphi + x$ $\sec (\varphi + x)$	43° 55' 12" 1,38829
t^{h} t°	21 37 46 324° 26' 30"	A'_N A_N Q	+2691" 0° 44' 51" 58 45 56
		a	59° 30' 47"

ной линии и поправок в азимуты) широту пункта достаточно знать с точностью 1', а долготу и поправку часов — с точностью 3—4^s.

Для определения азимута можно пользоваться обычными часами. При этом их целесообразно поставить по московскому декретному времени. В этом случае звездное время наблюдения и часовой угол вычисляются по формулам

$$s = (T_M - 3^{\text{h}}) + \mu (T_M - 3^{\text{h}}) + S_0 + \lambda; \quad t = s - \alpha.$$

Журнал определения приближенного астрономического азимута приведен в табл. 130, а вычисление азимута — в табл. 131.

§ 109. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЗИМУТА ПО ЧАСОВОМУ УГЛУ СОЛНЦА

На основании дифференциальной формулы изменения азимута светила

$$\Delta A = \frac{15 \cos \delta \cos q}{\sin z} \Delta t + \frac{\sin A}{\operatorname{tg} z} \Delta \varphi + \frac{\sin q}{\sin z} \Delta \delta$$

выгоднейшими условиями определения азимута по часовому углу Солнца являются утренние и вечерние часы, когда зенитное расстояние Солнца достаточно велико. Практически для определения

азимута Солнца необходимо наблюдать на зенитных расстояниях от 50 до 80° . Из этой же формулы следует, что погрешность в часовом угле Солнца в 1^s может дать погрешность в азимуте до $15''$.

Таким образом, при определении азимута по часовому углу Солнца время наблюдения нужно знать с большой точностью. Например, для определения астрономического азимута направления с погрешностью $10''$ астрономическую долготу пункта и поправку часов нужно знать с погрешностью, не превышающей $0,3^s$.

Имея в виду, что при наблюдениях методом «глаз—ухо» такого же порядка может быть постоянная часть ΔT погрешности момента T_H наблюдения Солнца, вряд ли имеет смысл говорить об определениях азимута методом «глаз—ухо» по часовому углу Солнца с точностью, превышающей $10''$. При определениях азимута с оптическим теодолитом целесообразно использовать для наблюдений Солнца двухстрелочный секундомер 51 СД. Общий порядок наблюдения, как и в других способах, связанных с определением часовых углов светил, следующий:

прием радиосигналов времени;

определение азимута направления на земной предмет по наблюдениям Солнца;

прием радиосигналов времени.

Для определения астрономического азимута с погрешностью $10''$ достаточно произвести 3 — 4 приема наблюдений с помощью оптического теодолита и двухстрелочного секундомера.

Каждый прием наблюдения азимута выполняется в следующем порядке.

При круге лево (право):

наведение трубы на земной предмет: запись отсчетов по горизонтальному лимбу;

наведение трубы на Солнце (перед наведением на окуляр трубы одевается светофильтр), наблюдение моментов прохождения левого (правого) края Солнца через три вертикальные нити методом «глаз—клавиша»; запись моментов T_i по секундомеру; запись отсчетов уровня накладного на горизонтальную ось (уровень и теодолит нужно все время прикрывать от действия солнечных лучей); запись отсчетов по горизонтальному лимбу; отсчет по вертикальному лимбу с точностью $1'$.

При круге право (лево):

наблюдение другого края Солнца так же, как при первом положении теодолита;

наведение трубы на земной предмет, запись отсчетов горизонтального лимба.

Если теодолит не имеет астрономической сетки нитей, то при каждом положении прибора (КЛ или КП) трижды наблюдается прохождение края Солнца через среднюю вертикальную нить; при этом для каждого прохождения записывается момент T по секундомеру и отсчет по горизонтальному лимбу. Пример журнала наблюдений приведен в табл. 132.


Журнал определения азимута по часовому углу Солнца

Пункт *Ивановка* $B = 44^{\circ} 58' 32''$, $L = 3^{\text{h}} 16^{\text{m}} 35,3^{\text{s}}$ Направление *Ивановка—Дерновка*

Теодолит Theo 010 № 0319; $\frac{\tau}{2} = 5,12''$ Секундомер № 023437

Дата 24 июля 1965 г. $u_{\text{r}} = +19,90^{\circ}$ в момент $X = 16^{\text{h}} 20,0^{\text{m}}$, $\omega = -0,77^{\circ}$

П р и е м 6

Объект наблюдений	Время T	Уровень	Горизонтальный лимб	Вертикальный лимб	Направления
КЛ					
п. Дерновка	33,1 ^s	8,6—43,9	60° 04' 35" 36,0"	59° 59'	$M = 60^{\circ} 04' 37,0''$ $N = 356^{\circ} 07' 42,5''$ $Q = 63^{\circ} 56' 54,5''$
	49,9		355° 19' 41" 41,5"		
	$\frac{16^{\text{h}} 35^{\text{m}} 06,8^{\text{s}}}{T_L = 16^{\text{h}} 34^{\text{m}} 49,9^{\text{s}}}$		42		
КП					
п. Дерновка	09,0 ^s	43,0—7,9 $b^{0/2} = -0,80$ $\Delta N_b = -2,3''$	176° 55' 48" 48,0"	298° 20'	$N' = 356^{\circ} 07' 44,8''$ $\Delta N_b = -2,3$ $N = 356^{\circ} 07' 42,5''$
	26,0		48	$z'_{\odot} = 60^{\circ} 50'$	
	$\frac{16^{\text{h}} 40^{\text{m}} 42,7^{\text{s}}}{T_R = 16^{\text{h}} 40^{\text{m}} 25,9^{\text{s}}}$		240° 04' 38" 38",	$\rho_0 = +2'$	
	$\frac{T_H = 16^{\text{h}} 37^{\text{m}} 37,9^{\text{s}}}{\Delta T = 2^{\text{m}} 48^{\text{s}} = 168^{\text{s}}}$		38	$z_{\odot} = 60^{\circ} 52'$	
	$5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 = 9,94''$			$\text{ctg } z_{\odot} = 0,557$	

В ы ч и с л е н и я

Поправки и ход секундомера (часов) из приемов радиосигналов времени в зависимости от принятой методики вычисления часового угла Солнца могут быть вычислены в системе местного звездного или среднего времени с известной долготой пункта λ .

Вычисление поправок и хода секундомера относительно местного звездного времени производятся по формулам:

$$u_1^* = s_1 - X', \quad u_2^* = s_2 - X'',$$

$$u^* = \frac{u_1^* + u_2^*}{2} \quad \text{в момент } X = \frac{X' + X''}{2};$$

$$\omega^* = \frac{u_2^* - u_1^*}{(X'' - X')h};$$

$$s_{1,2} = UT \, I_{1,2} + \mu UT \, I_{1,2} + S_0 + \lambda.$$

Вычисления поправок и хода относительно местного среднего времени производят по формулам:

$$u_1 = m_1 - X' \quad \text{в момент } X',$$

$$u_2 = m_2 - X'' \quad \text{в момент } X'',$$

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad \text{в момент } X = \frac{X' + X''}{2},$$

$$\omega = \frac{u_2 - u_1}{(X'' - X')}$$

где

$$m_{1,2} = UT \, I_{1,2} + \lambda.$$

В журнале наблюдений вычисляются (см. табл. 132):
средний момент наблюдения Солнца в полуприеме

$$T_{L,R} = \frac{\sum T_i}{3}$$

и в приеме

$$T_H = \frac{T_L + T_R}{2};$$

разность

$$\Delta T = T_H - T_{L,R} \text{ и } 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2;$$

зенитное расстояние Солнца в приеме (до минут)

$$z_O = \frac{L^b - R^b}{2} + \rho_0;$$

поправка горизонтального направления на Солнце за наклон горизонтальной оси

$$\Delta N_b := b^{\partial/2} \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} z_{\odot},$$

$$b^{\partial/2} = \frac{(\mathcal{L} + \Pi)_0 - {}_0(\mathcal{L} + \Pi)}{2};$$

горизонтальное направление на местный предмет

$$M = \frac{L_{\Delta} + (R_{\Delta} \pm 180^{\circ})}{2};$$

горизонтальное направление на Солнце

$$N = \frac{L_{\odot} + (R_{\odot} \pm 180^{\circ})}{2} + \Delta N_b;$$

горизонтальный угол между Солнцем и местным предметом

$$Q = M - N.$$

Азимут Солнца вычисляется со средним моментом наблюдения в приеме по формулам

$$\operatorname{ctg} A'_N = \sin \varphi \operatorname{ctg} t_{\odot} - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta_{\odot} \operatorname{cosec} t_{\odot};$$

$$A_N = A'_N + \Delta A_W,$$

где

$$\Delta A_W = 5,454 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^2 \frac{d^2 A}{dt^2},$$

$$\frac{d^2 A}{dt^2} = k_1 \sin A'_N - k_2 \sin 2A'_N,$$

где k_1 и k_2 выбираются из таблиц прил. 2.

Часовой угол Солнца t_{\odot} может быть вычислен:

по местному звездному времени

$$t_{\odot} = T_H + u^* + \omega^* (T_H - X) - \alpha_{\odot};$$

по местному среднему времени

$$t_{\odot} = T_H + u + \omega (T_H - X) + E.$$

Склонение Солнца δ_{\odot} , его прямое восхождение α_{\odot} и уравнение времени E интерполируются из таблиц Солнца АЕ на момент эфемеридного времени

$$(ET)^h = (UT1 + \Delta T)^h.$$

Астрономический азимут направления на местный предмет из каждого приема вычисляется по формуле

$$a = A_N + Q.$$

Переход к геодезическому азимуту можно осуществить по формуле Лапласа (если известна геодезическая долгота пункта) или по схеме уклонений отвесной линии и поправок в астрономические азимуты направлений. Если известны геодезические координаты

пункта или их можно снять с карты крупного масштаба, то из наблюдений Солнца можно непосредственно получить геодезический азимут направления, без знания астрономической долготы пункта.

В этом случае половину приемов наблюдения азимута необходимо выполнять утром (при положении Солнца на Востоке) и половину приемов вечером (при положении Солнца на Западе). Для каждого приема составляется уравнение поправок вида

$$\Delta a_r + b_i \xi + c_i \eta + l_{r_i} = v_i \text{ с весом } P_i = \sin^2 z_{\odot_i},$$

$$b_i = -\sin A'_{r_i} \operatorname{ctg} z_{\odot_i}, \quad c_i = \cos A'_{r_i} \operatorname{ctg} z_{\odot_i},$$

где

$$l_{r_i} = (a_0 - A_{r_i}) - Q_i.$$

Геодезический азимут Солнца вычисляется по формуле

$$\operatorname{ctg} A'_{r_i} = \sin B \operatorname{ctg} t_{r_i} - \cos B \operatorname{tg} \delta_{\odot_i} \operatorname{cosec} t_{r_i};$$

$$A_{r_i} = A'_{r_i} + \Delta A_{w_i},$$

где

$$t_{r_i} = T_{H_i} + u_r + \omega (T_{H_i} - X) + E_i$$

или

$$t_{r_i} = T_{H_i} + u_r^* + \omega^* (T_{H_i} - X) - \alpha_{\odot}.$$

Поправка часов u_r или u_r^* находится из приема радиосигналов времени с геодезической долготой пункта L .

Из совместного решения n уравнений поправок по методу наименьших квадратов находят значения Δa_r , ξ и η и оценивают точность их вывода. При наблюдениях Солнца на больших зенитных расстояниях вывод геодезического азимута направления производится с большой точностью, а вывод составляющих ξ и η с малой.

При определениях геодезического азимута с погрешностью $10''$ и грубее можно производить приближенное уравнивание по формулам

$$\Delta a_r = -\frac{[P_i l_i]}{[P_i]};$$

$$a_r = a_0 + \Delta a_r.$$

Оценку точности производят по формуле

$$m_{a_r} = \sqrt{\frac{[P_i^2]}{[P] (n-1)} + m_L^2 \sin^2 B},$$

где

$$v_i = l_{cp} - l_i, \quad l_{cp} = \frac{[P_i l_i]}{[P_i]}.$$

Пример вычисления азимута по часовому углу Солнца приведен в табл. 133. Вычисления азимута в этом примере произведены с геодезическими координатами пункта *B* и *L*. Порядок, формулы и схема при вычислениях астрономического азимута направления с астрономическими координатами пункта φ и λ будут точно такими же, как и при вычислениях с геодезическими координатами.

Пример приближенного уравнивания геодезического азимута направления на земной предмет приведен в табл. 134.

Т а б л и ц а 133

Вычисление азимута по часовому углу Солнца

Направление *Ивановка—Дерновка*

Координаты пункта *Ивановка* $B = 44^\circ 58' 32''$ $L = 3^h 16^m 35,30^s$

Дата 24 июля 1965 года $u_r = +19,90^s$, $X = 16^h 20,0^m$, $\omega = -0,77^s$

$\sin B = 0,706805$, $\cos B = 0,707408$

Действия	Номер приема прием 6	Действия	Номер приема прием 6
T_H	16 ^h 37 ^m 37,9 ^s	v_E	-0,052 ^s
u_r	+19,9	$v_E (ET)^h$	-0,75 ^s
$\omega (T_H - X)$	-0,2	E	11 ^h 53 ^m 36,48 ^s
m_r	16 37 57,6	$t_r = m_r + E$	4 ^h 31 ^m 34,1 ^s
L	3 16 35,3	t_r'	67° 53' 31,5"
$UT1$	14 21 22,3	$\text{ctg } t_r$	0,406218
ΔT	+35,0	$\text{cosec } t_r$	1,079358
ET	14 21 57,3	$\sin B \text{ ctg } t_r$	0,287117
$(ET)^h$	14,366 ^h	$\cos B \text{ tg } \delta_\odot \text{ cosec } t_r$	0,275486
δ_{\odot_0}	19° 57' 54,9"	$\text{ctg } A'_r$	0,011631
v_δ	-31,55"	A'_r	269° 20' 01,0"
$v_\delta (ET)^h$	-7' 33,2"	ΔA_W	-2,8
δ_{\odot}	19° 50' 21,7"	Q	63° 56' 54,5"
$\text{tg } \delta_{\odot}$	0,360798	a_{r_i}	333° 16' 52,7"
$\cos B \text{ tg } \delta_{\odot}$	0,255231	a_0	333 16 50,0
E_0	11 ^h 53 ^m 37,23 ^s	l_i	-2,7"

Приближенное уравнение геодезического азимута

Направление *Ивановка—Дерновка*

Теодолит Theo 010 № 0319 Секундомер 51СД № 023437

Дата 24 июля 1965 года. $a_0 = 333^\circ 16' 50''$

Номер приема	z_0	P	l	v	v^2
Утро					
1	65° 30'	0,83	+4,8"	+2,6"	6,76
2	62 23	0,79	+1,3	-0,9	0,81
3	59 58	0,75	+6,3	+4,1	16,81
4	57 02	0,71	+0,6	-1,6	2,56
Вечер					
5	56 32	0,70	+2,7	+0,5	0,25
6	60 52	0,77	-2,7	-4,9	24,01
7	62 40	0,80	-1,0	-3,2	10,24
8	66 02	0,84	+5,4	+3,2	10,24

$$[P] = 6,19, \quad [Pl] = 13,71, \quad [Pv] = -0,1, \quad [Pv^2] = 56,13$$

$$\Delta a_r = -\frac{13,71}{6,19} = -2,2''; \quad a_r = 333^\circ 16' 50'' - 2,2'' = 333^\circ 16' 47,8''$$

$$m_{a_r} = \sqrt{\frac{56,13}{6,2 \times 7} + (15 \times 0,005)^2 \cdot 0,5} = 1,2''$$

1. Бакулин П. И., Блинов И. С. Служба точного времени. М., Наука, 1968
2. Беляев Н. А. К вопросу астрономических определений геодезического азимута прямым методом. — *Астрономический журнал АН СССР*, т. XXX, 1953, вып. 2, с. 197—209.
3. Беляев Н. А. Полевая фотоэлектрическая установка для астрономических определений. — *Геодезия и картография*, 1963, № 10, с. 17—25.
4. Беляев Н. А. Фотоэлектрическое определение геодезического азимута прямым методом. — *Геодезия и картография*, 1964, № 9, с. 13—17.
5. Беляев Н. И. О систематической разности в азимутах, полученных из двух кульминаций полярных звезд на пассажном инструменте. — *Известия ГАО*, т. II, № 100, 1927, с. 81—88.
6. Белоцерковский Д. Ю. О вычислении эталонного времени в средние моменты передачи — радиосигналов. — *Труды Института Комитета стандартов, мер и измерительных приборов*, вып. 58, 1962, с. 58—82.
7. Блажко С. Н. О влиянии неправильностей цапф на определение момента кульминации светил. — *Астрономический журнал АН СССР*, т. XXII, 1945, вып. 1, с. 23—33.
8. Блажко С. Н. Курс практической астрономии. М.—Л., 1951.
9. Блохин Н. А. Об искажениях значений наклона горизонтальной оси в переносных пассажных инструментах Бамберга с ломаной трубой. — *Геодезист*, 1926, № 7, 8, с. 12—18.
10. Брандт В. Э. О выборе звезд для определения времени и азимута на пассажном инструменте. — *Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэро съемки и картографии*, вып. 64, 1949, с. 60—71.
11. Брандт В. Э. Фотоэлектрическая установка для регистрации прохождений звезд. — *Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэро съемки и картографии*, вып. 112, 1956, с. 23—109.
12. Буткевич А. В. Упрощение вычислений при определении поправки хронометра по способу Деллена. — *Астрономический журнал*, т. XXII, 1955, вып. 5, с. 445—461.
13. Буткевич А. В. О вычислении широты по соответствующим высотам двух звезд. — *Астрономический журнал*, т. XXXIV, 1957, вып. 4, с. 625—636.
14. Венцель М. К. Полевая астрономия. Ч. II. Редбюро ГУГК СНК СССР, 1940.
15. Власов Б. И. Об определении азимутов Лапласа. — *Астрономический журнал*, т. XXXIV, 1957, вып. 3, с. 477—483.
16. *Введение в практическую астрономию* (под ред. В. В. Каврайского). Л., изд. Морской академии, 1937 г.
17. Гедеонов Д. Д. Об определении времени в меридиане переносным пассажным инструментом. — *Записки ВТО ГШ*, т. XXXIX, 1884, с. 251—262.
18. Деллен В. К. Определение времени посредством переносного пассажного инструмента в вертикале Полярной звезды. — *Записки ВТО ГШ*, т. XXV, 1864, т. XXXVI, 1874, с. 21—45.
19. Долгов П. Н. Определение времени пассажным инструментом в меридиане. М., ГИЗТТЛ, 1952.
20. Долгов П. Н. Определение времени по способу Цингера универсальным инструментом с применением саморегистрирующего микрометра и таблиц позиционных углов. — *Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэро съемки и картографии*, вып. 24. 1938.
21. Зверев М. С. О выборе звезд для наблюдений с пассажным инструментом. — *Астрономический журнал АН СССР*, т. XXI, 1948, вып. 4, с. 267—279.
22. Зверев М. С. О некоторых систематических ошибках наблюдений на пассажном инструменте. — *Вестник МГУ*, 1948, № 2, с. 23—35.

23. *Зверев М. С.* Исследование результатов астрономических наблюдений службы времени ГАИШ в 1941—1944 гг. — Труды ГАИШ, т. XVIII, 1950, вып. 2, с. 22—146.
24. *Зверев М. С.* Фундаментальная астрономия. — Успехи астрономических наук, т. V, М.—Л., АН СССР, 1950; т. VI, М.—Л., АН СССР, 1954, с. 3—143.
25. *Изотов А. А.* Об азимутах Лапласа. — Сборник ГУГК, вып. XIV, 1946, с. 3—10.
26. *Изотов А. А.* Некоторые задачи научно-исследовательской работы в области геодезии. — Сборник ГУГК, вып. XII, 1945, с. 3—24.
27. *Ильинич А. А.* Об исследовании цапф геодезического инструмента, предназначенного для определения азимута. — Геодезист, 1940, № 8, с. 65—67.
28. *Инструкция* о построении государственной геодезической сети Союза ССР, М., Недра, 1966.
29. *Кагановский Г. М., Могилевский Э. А.* К вопросу определения геодезического азимута из наблюдений прохождений звезд в меридиане. — Геодезия и картография, 1958, № 12, с. 10—12.
30. *Каврайский В. В.* Универсальный инструмент. Л., изд. Морской академии, 1937.
31. *Колупаев А. П.* Определение астрономических долгот 1 класса на Севере при помощи универсала с контактным микрометром. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 81, 1951, с. 6—80.
32. *Колупаев А. П., Мауерер В. Т., Старостин А. М.* Практическое руководство по геодезической астрономии. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 148, 1962.
33. *Колупаев А. П.* Новая методика определения времени по способам Цингера и Деллена с применением контактного микрометра. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 124, 1959 с. 3—41.
34. *Константинов А. И., Флер А. Г.* Время. М., Изд-во стандартов, 1971, с. 297—308.
35. *Красовский Ф. Н.* Руководство по высшей геодезии. Часть I., вып. 1, М., Геодезиздат, 1939; часть II. М., Геодезиздат, 1942.
36. *Крыжановский А. А.* Определение времени универсальным инструментом вблизи меридиана. — Сборник научно-техн. статей, т. XVIII, 1966, с. 27—35.
37. *Кузнецов А. Н.* О сравнении основных способов определения времени. — Геодезия и картография, 1956, № 12, с. 15—22.
38. *Кузнецов А. Н.* О сравнении способа Талькотта и способа Певцова для определения широты. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 32, 1958, с. 37—40.
39. *Кузнецов А. Н.* Геодезическая астрономия. М., Недра, 1966.
40. *Куликов К. А.* Изменяемость широт и долгот. М., Гизфизмат, 1962.
41. *Лизунов С. М.* Расчет допусков на овальность цапф астрономогеодезических инструментов. — Геодезист, 1940, № 12, с. 15—18.
42. *Маринбах А. Б.* Об астрономическом определении геодезического азимута. — Астрономический журнал АН СССР, т. XXVIII, 1951, вып. 4, с. 263—277.
43. *Мауерер В. П.* Колебания хода хронометров за короткие промежутки времени. — Сборник рефератов ЦНИИГАиК, 1954, вып. 1, с. 3—8.
44. *Мещанский Л. Б.* О точности определения астрономических долгот 1 класса. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 81, 1951, с. 110—139.
45. *Могилевский Э. А.* Определение широты по наблюдениям пар звезд в общем вертикале универсального инструментом. — Геодезия, 1969.
46. *Могилевский Э. А.* Развитие способов определения времени универсальным инструментом вблизи меридиана. Геодезия, 1969.
47. *Машимов М. М.* Вычисление видимых мест звезд и Солнца на ЭВМ. — Геодезия и картография, 1965, № 12, с. 7—23.

48. *Машимов М. М.* К вопросу уравнивания результатов измерений на ЭЦВМ групповым итеративным методом. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1968, вып. 1, с. 74—79.

49. *Неверов Л. В., Уралов С. С.* Теория алгоритма составления эфемерид равновысотных пар звезд на ЭВМ. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1977, вып. 1, с. 57—62.

50. *Неверов Л. В., Уралов С. С.* Алгоритмы подбора и составления эфемерид равновысотных пар звезд в общем вертикале на ЭВМ. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1977, вып. 5.

51. *Немиро А. А.* О влиянии коллимационной ошибки на результаты наблюдений прямых восхождений. — Изв. ГАО, т. XVIII, 1951, вып. 5, с. 104—108.

52. *Немиро А. А.* Об определении абсолютного азимута и наклона оси пассажного инструмента. — Изв. ГАО, XVIII, 1950, вып. 2, с. 43—65.

53. *Нумеров Б. В.* Теория универсального инструмента. *Астрономический Ежегодник на 1922 г.*, с. 239—266.

54. *Нумеров Б. В.* Исследование цапф пассажного инструмента. — Труды АО Петроградского университета, т. 4, 1923, с. 6—17.

55. *Орлов А. Я.* Служба широты. *Избранные труды*. Т. 1. Киев, АН СССР, 1964. 355 с.

56. *Ортенберг Н. А.* Определение геодезического азимута из наблюдений пар Цингера. — Геодезия и картография, 1962, № 4, с. 26—32.

57. *Павлов Н. Н.* Фотоэлектрическая регистрация звездных прохождений. — Труды ГАО, серия II, т. IX, 1946.

58. *Павлов Н. Н.* О термических эффектах в переключивающихся пассажных инструментах. — *Астрономический журнал АН СССР*, т. XXX, 1953, вып. 1, с. 85—92.

59. *Павлов Н. Н.* Систематические разности поправок, определенных пулковской службой времени. — *Астрономический журнал АН СССР*, т. II, 1934, вып. 1, с. 81—91.

60. *Павлов Н. Н.* Об исследовании цапф переносных пассажных инструментов. Изд. ГАО, т. XVIII, 1951, вып. 5, с. 82—103.

61. *Пеллинен Л. П.* Исследование по угловым измерениям в триангуляции. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 114, 1957, с. 53—125.

62. *Петров Г. М.* О выборе звезд для определения азимута пассажного инструмента Службы времени. — Изв. ГАО, т. XXI, 1958, вып. 2, № 161, с. 46—61.

63. *Подобед В. В.* *Фундаментальная астрометрия*. М., Гизфизмат, 1962.

64. *Рабинович Б. Н.* О действии боковой рефракции в триангуляции СССР. — Труды Центрального науч.-исслед.-ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 62, 1949, с. 3—96.

65. *Рабочие эфемериды* способа Талькотта для широт от $+35^\circ$ до $+65^\circ$, эпоха 1980,0. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, 1964, вып. 158.

66. *Рабочие эфемериды* пар Цингера для широт $60-70^\circ$ эпоха 1960,0. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 20, 1951.

67. *Рабочие эфемериды* пар Цингера для широт $50-60^\circ$, на эпоху 1965,0. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 134, 1960.

68. *Рабочие эфемериды* пар Цингера для широт $40-50^\circ$, на эпоху 1965,0. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 136, 1961.

69. *Рабочие эфемериды* пар Цингера для широты $30-40^\circ$, на эпоху 1965,0. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 138, 1961.

70. *Рекомендации по учету наклона нити при определении широты по способу Талькотта в произвольных малых часовых углах*. М., ОНТИ ЦНИИГАиК, 1977.

71. *Северов М. Н.* Об учете бокового гнуптия трубы. — Геодезия и картография, 1961, № 9, с. 30—33.
72. *Старостин А. М.* Определение времени по измеренным разностям азимутов звезд. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 81, 1951, с. 140—155.
73. *Старостин А. М.* Об исследовании цапф переносных пассажных и универсальных инструментов. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 87, 1952, с. 89—104.
74. *Старостин А. М.* Исследования по вопросам повышения точности определения азимутов. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 124, 1959, с. 97—124.
75. *Старостин А. М.* Определение геодезического азимута из наблюдений прохождений звезд в меридиане. — Труды Центрального науч.-исслед. ин-та геодезии, аэросъемки и картографии, вып. 147, 1962, с. 35—56.
76. *Старостин А. М.* Непосредственное определение геодезического азимута. — Геодезия и картография, 1962, № 8, с. 3—12.
77. *Струве В. Я.* Дуга меридиана в $25^{\circ}20'$ между Дунаем и Ледовитым морем, измеренная с 1816 по 1855 г. Санкт-Петербург, 1861, т. I, с. 334, т. II, с. 485.
78. *Уралов С. С.* Общая теория методов геодезической астрономии, М., Недра, 1973, с. 271.
79. *Уралов С. С., Неверов Л. В.* Оптимальные методы астрономических определений в условиях Антарктиды. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1976, вып. 6, с. 57—62.
80. *Уралов С. С., Неверов Л. В.* Теория алгоритма составления эфемерид равновысотных пар звезд способа Певцова на ЭВМ. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1977, вып. 4, с. 79—82.
81. *Уралов С. С., Неверов Л. В.* Составление эфемерид равновысотных пар звезд, наблюдаемых в плоскости общего вертикала, с помощью ЭВМ. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1977, вып. 5, с. 76—80.
82. *Халхунов В. З.* Сферическая астрономия. М., Недра, 1972.
83. *Цветков К. А.* Практическая астрономия. М., Геодезиздат, 1951, с. 528.
84. *Цингер Н. Я.* Курс астрономии (часть практическая). Изд. 2. Петроград, 1915.
85. *Щеглов В. П.* Опыт исследования некоторых систематических ошибок при определениях времени переносным пассажным инструментом. — Астрономический журнал АН СССР, т. XXII, 1950, вып. 6, с. 357—371.
86. *Щеглов В. П.* О так называемых сезонных ошибках при определении времени на пассажных инструментах. — Астрономический журнал АН СССР, т. XXVII, 1950, вып. I, с. 54—56.
87. *Язев И. Н.* Определение времени по способу проф. Н. Д. Павлова. — Ученые труды Сиб. сельхоз. академии, 1925, вып. 5.
88. *Янченко С. А.* Относительный азимутальный способ определения времени при помощи универсального инструмента. — Северо-Морской путь, т. VIII, 1937.

Таблица коэффициентов m и n для вычисления $\frac{d^2z}{dt^2}$

(Выписка для широт 50—56° и азимутов 0—20°)

$$m = \cos \varphi \sin \varphi \cos A$$

$$n = \cos^2 \varphi \cos^2 A$$

A	φ							A	ψ						
	50°	51°	52°	53°	54°	55°	56°		50°	51°	52°	53°	54°	55°	56°
0	0,4924	0,4890	0,4851	0,4806	0,4755	0,4698	0,4636	0°	0,4132	0,3960	0,3790	0,3622	0,3455	0,3290	0,3127
1	4920	4890	4851	4806	4755	4698	4635	1	4131	3959	3789	3621	3454	3289	3126
2	4921	4888	4849	4803	4752	4696	4633	2	4127	3956	3786	3617	3451	3286	3123
3	4917	4884	4845	4800	4749	4649	4630	3	4120	3950	3780	3612	3445	3181	3118
4	4912	4879	4840	4795	4744	4687	4625	4	4112	4941	3772	3604	3438	3274	3112
5	4905	4872	4833	4788	4737	4681	4618	5	4100	3930	3762	3594	3429	3265	3103
6	4807	4864	4825	4780	4729	4673	4611	6	4087	3917	3749	3582	3417	3254	3098
7	4887	4854	4815	4770	4720	4663	4601	7	4070	3901	3734	3568	3404	3241	3081
8	4876	4843	4804	4760	4709	4653	4591	8	4052	3884	3717	3552	3388	3226	3066
9	4863	4831	4792	4747	4697	4641	4579	9	4031	3864	3698	3533	3370	3209	3050
10	4897	4817	4778	4733	4683	4627	4565	10	4007	3841	3676	3513	3351	3191	3033
11	4834	4801	4762	4718	4668	4612	4550	11	3981	3816	3652	3490	3329	3170	3013
12	4816	4784	4745	4701	4651	4596	4535	12	3953	3789	3627	3465	3306	3148	2992
13	4798	4765	4727	4683	4633	4578	4517	13	3923	3760	3599	3439	3280	3123	2969
14	4778	4745	4707	4664	4614	4559	4498	14	3890	3729	3569	3410	3253	3097	2944
15	4756	4724	4686	4643	4593	4538	4478	15	3855	3695	3536	3379	3223	3070	2918
16	4733	4701	4664	4620	4571	4516	4456	16	3818	3660	3502	3347	3192	3040	2889
17	4709	4677	4639	4596	4547	4493	4433	17	3779	3622	3466	3312	3160	3009	2860
18	4683	4651	4614	4571	4523	4469	4409	18	3737	4582	3426	3276	3125	2976	2828
19	4656	4624	4587	4544	4496	4442	4383	19	3694	3541	3389	3238	3089	2941	2796
20	4627	4596	4559	4516	4469	4415	4356	20	3648	3497	3347	3198	3051	2905	2761

Таблица коэффициентов k_1 и k_2 для вычисления $\frac{d^2A}{dt^2}$

(Выписка для широт 50—56° и зенитных расстояний 50—75°)

$$k_1 = \frac{1}{2} \sin 2\varphi \operatorname{ctg} z$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \cos^2 \varphi (\operatorname{ctg}^2 z + \operatorname{cosec}^2 z)$$

z	k ₁							z	k ₂						
	50°	51°	52°	53°	54°	55°	56°		50°	51°	52°	53°	54°	55°	56°
50°	0,4132	0,4104	0,4071	0,4033	0,3990	0,3942	0,3890	50°	0,4975	0,4769	0,4564	0,4361	0,4160	0,3961	0,3765
51	3987	3960	3929	3892	3851	3805	3754	51	2775	4577	4381	4186	3993	3802	3614
52	3847	3821	3790	3755	3715	3671	3622	52	4588	4398	4209	4022	3836	3653	3472
53	3711	3685	3656	3622	3583	3541	3493	53	4412	4229	4048	3868	3689	3513	3339
54	3578	3553	3525	3492	3455	3414	3368	54	4247	4071	3896	3723	3551	3382	3214
55	3449	3425	3397	3365	3330	3290	3246	55	4092	3922	3754	3587	3421	3258	3097
56	3321	3299	3272	3242	3207	3169	3127	56	3946	3782	3620	3459	3299	3142	2986
57	3198	3176	3151	3121	3088	3051	3011	57	3808	3650	3494	3338	3184	3032	2882
58	3077	3056	3032	3003	2971	2936	2897	58	3679	3527	3375	3225	2076	2930	2784
59	2959	2939	2915	2888	2857	2823	2786	59	3558	3410	3264	3119	2975	2833	2692
60	2843	2824	2801	2775	2745	2713	2677	60	3443	3300	3159	3018	2879	2742	2606
61	2729	2711	2689	2664	2636	2604	2570	61	3335	3197	3060	2924	2789	2056	2524
62	2618	2600	2580	2556	2528	2498	2465	62	3234	3100	2967	2835	2704	2575	2448
63	2509	2492	2472	2449	2423	2394	2362	63	3139	3008	2879	2751	2624	2499	2375
64	2402	2385	2366	2344	2319	2292	2261	64	3049	2922	2797	2672	2549	2428	2307
65	2296	2281	2262	2241	2217	2191	2162	65	2964	2841	2719	2598	2479	2360	2243
66	2192	2177	2160	2140	2117	2092	2064	66	2885	2765	2647	2529	2412	2297	2183
67	2090	2076	2059	2040	2018	1994	1968	67	2810	2694	2578	2463	2350	2238	2127
68	1989	1976	1960	1942	1921	1898	1873	68	2740	2627	2514	2402	2291	2182	2074
69	1890	1877	1862	1845	1825	1804	1780	69	2675	2564	2454	2345	2237	2130	2024
70	1792	1780	1766	1749	1731	1710	1687	70	2613	2505	2397	2291	2185	2081	1978
71	1695	1684	1670	1655	1637	1618	1596	71	2556	2450	2345	2240	2137	2035	1934
72	1600	1589	1576	1562	1545	1527	1506	72	2502	2398	2295	2193	2092	1992	1894
73	1505	1495	1483	1469	1453	1436	1417	73	2452	2350	2249	2149	2050	1952	1856
74	1412	1402	1391	1378	1364	1347	1329	74	2406	2306	2207	2109	2012	1915	1821
75	1319	1310	1300	1288	1274	1259	1242	75	2363	2265	2167	2071	1976	1881	1788

**Звездная карта
в полярной стереографической проекции**

Звездная карта (рис. 95) содержит звезды со склонениями от -30 до $+30^\circ$ для которых в Астрономическом Ежегоднике СССР даются видимые координаты, а также звезды со склонениями от -35 до 0° из каталога FK4. Номера звезд соответствуют каталогу Астрономического Ежегодника на 1975 г. Положения звезд на карте соответствуют эпохе 1985.0. Центр (полус) карты отмечен малой окружностью с двумя пересекающимися диаметрами. Небесный экватор изображен на карте окружностью. За рамкой карты по окружности подписаны часы и минуты, соответствующие величинам прямых восхождений звезд. Расстояния изображенных на карте звезд от центра карты в полярной стереографической проекции вычисляются по формуле

$$\rho = R \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\delta}{2} \right), \quad (a)$$

где R — радиус экватора звездной карты, равный 150 мм, δ — склонение звезды. В случае необходимости звездную карту можно дополнить, нанося на нее звезды из любых других звездных каталогов по величинам их прямых восхождений и по расстояниям звезд от центра карты, вычисленным по формуле (a).

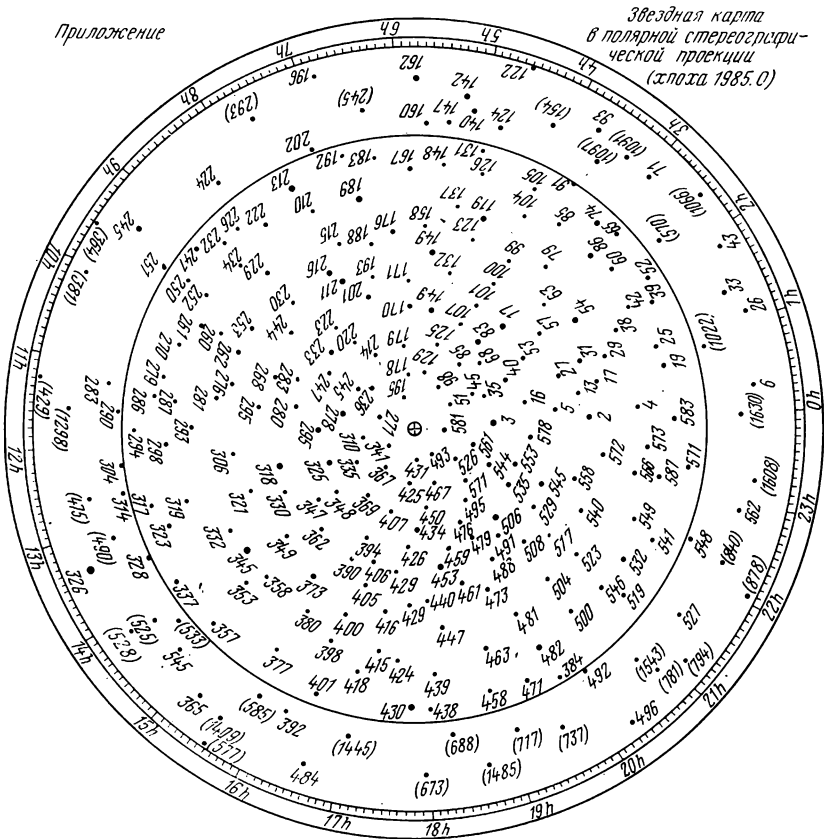


РИС. 95

**Номограмма к звездной карте
в полярной стереографической проекции**

Номограмма к звездной карте в полярной стереографической проекции предназначена для подбора и составления эфемерид звезд для наблюдений любым зенитальным или азимутальным способом, а также для опознавания неизвестных наблюдаемых звезд.

Для построения номограммы необходимо знать широту наблюдаемого пункта с точностью 5'.

Номограмму можно строить как на прозрачной основе, так и на непрозрачной с последующим снятием копии на прозрачную основу.

Для составления номограммы необходимо предварительно произвести вычисления установочных величин, а также радиусов альмукантаратов и вертикалов.

Установочными величинами являются:

$d_0 = R \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$ — расстояние между проекциями полюса мира и зенита; здесь и в последующих формулах R — радиус звездной карты;

$X_0 = R \sec \varphi$ — расстояние от проекции зенита до линии YU , на которой располагаются центры вертикалов;

$d_i = \frac{R}{2} \left(\frac{90^\circ - z_i + \varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{90^\circ - z_i - \varphi}{2} \right)$ — расстояние от полюса мира P до центра альмукантарата z_i по меридиану;

$y_i = R \sec \varphi \operatorname{ctg} A_i$ ($y_i = r_{b_i} \cos A_i$) — расстояние по оси YU от меридиана до центра вертикала с азимутом A_i (азимуты отсчитываются от точки Севера).

Радиусы альмукантаратов и вертикалов вычисляются по следующим формулам:

$r_{a_i} = \frac{R}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{90^\circ - z_i + \varphi}{2} - \operatorname{tg} \frac{90^\circ - z_i - \varphi}{2} \right)$ — радиус альмукантарата

с зенитным расстоянием z_i ;

$r_{b_i} = R \sec \varphi \operatorname{cosec} A_i$ — радиус вертикала с азимутом A_i .

Наиболее целесообразным интервалом при построении сети альмукантаратов и вертикалов является интервал в 2° .

Номограмму строят в определенной последовательности (рис. 96).

1. На листе чертежной бумаги или на прозрачной основе проводят линию меридиана NS , на которой отмечают точки P и Z на расстоянии d_0 .

2. Откладывают к северу от точки Z по линии меридиана расстояние X_0 и через полученную точку H_0 проводят линию YU перпендикулярно к линии NS .

3. Для построения альмукантаратов откладывают от точки P по линии NS в сторону S расстояние d и из полученной точки k_i радиусом r_{a_i} проводят окружность — изображение альмукантарата z_i .

4. Для построения вертикалов откладывают от точки H_0 на линии YU расстояние y_i с учетом его знака и из полученной точки c_i радиусом r_{b_i} проводят дугу окружности, огра-

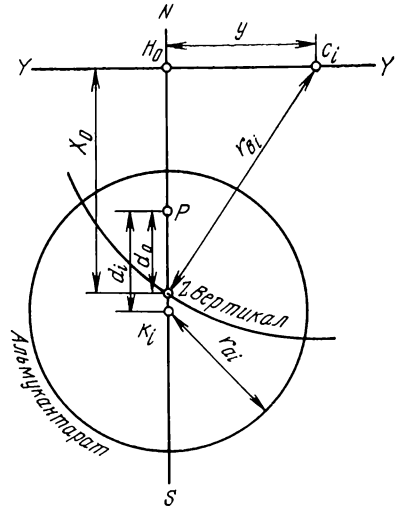


РИС. 96

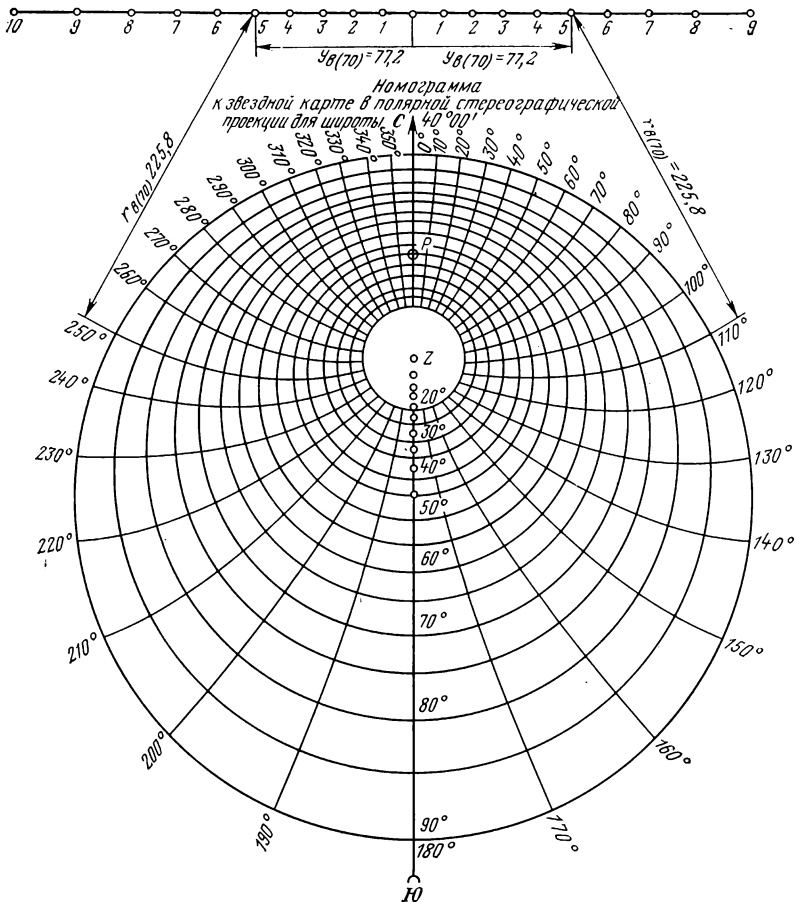


РИС. 97

ниченную альмукантаратом $z = 90^\circ$. Изображения всех вертикалов должны проходить через зенит Z .

5. Если номограмма строилась на чертежной бумаге, то с нее снимается копия на прозрачную основу. Пример составления номограммы для $\varphi = 40^\circ$ представлен на рис. 97. Расчеты для вертикалов приведены в табл. 1, а для альмукантаратов — в табл. 2.

Последовательность работы с номограммой при составлении эфемерид звезд

Для нахождения зенитного расстояния и азимута любой звезды в заданный момент звездного времени s совмещают полюс номограммы с полюсом звездной карты; вращая номограмму, устанавливают южный конец линии NS на отсчет s часовой шкалы звездной карты. При этом положении номограммы, пользуясь сетью альмукантаратов и вертикалов, отсчитывают зенитное расстояние и азимут любой звезды, нанесенной на карте.

Расчеты для вертикалов

Вычисление радиусов вертикалов
и координат их центров

$$r_b = R \sec \varphi \operatorname{cosec} A$$

$$x = R \sec \varphi$$

$$y = r_b \sec A; \quad \sec \varphi = 1,4138$$

$$x_0 = 150 \cdot \sec \varphi = 212,1 \text{ мм}$$

№ п/п	A	r, мм	y, мм
1	90	212,1	00
2	85	212,9	18,6
3	80	215,3	37,4
4	75	219,6	56,8
5	70	225,7	77,2
6	65	234,0	98,9
7	60	244,9	122,4
8	55	258,9	148,5
9	50	276,8	177,9
10	45	299,9	212,1
11	40	329,9	252,7
12	35	369,7	302,8
13	30	424,1	367,3
14	25	501,8	454,8
15	20	620,0	582,6
16	15	819,4	791,4
17	10	1221,3	1202,7
18	5	2433,2	2423,9
19	0	∞	∞

Расчеты для альмукантаратов

$$r = \frac{R}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{90 - z + \varphi}{2} - \operatorname{tg} \frac{90 - z - \varphi}{2} \right)$$

$$d = \frac{R}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{90 - z + \varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{90 - z - \varphi}{2} \right)$$

№ п/п	z	r, мм	d, мм
1	90	+212,2	+150,1
2	85	188,2	133,6
3	80	167,8	120,5
4	75	150,0	109,9
5	70	134,4	101,2
6	65	120,4	93,9
7	60	107,6	87,9
8	55	96,0	82,9
9	50	85,1	78,6
10	45	75,0	75,0
11	40	65,5	72,0
12	35	56,4	69,5
13	30	47,7	67,5
14	25	39,3	65,8
15	20	31,2	64,4
16			
17			
18	0	00,0	62,2

Для опознавания неизвестной наблюдаемой звезды устанавливают южный конец линии *NS* номограммы на отсчет шкалы времени, соответствующий моменту *s* наблюдения звезды, следя одновременно за тем, чтобы полюс номограммы был совмещен с полюсом звездной карты.

При этом положении номограммы по измеренным значениям *z* и *A* на карте находят наблюдаемую звезду.

При составлении эфемерид для наблюдений звезд в любом заданном альмукантарате *z_i* на номограмме поднимают этот альмукантарат карандашом. Далее, совместив полюс номограммы *P* с полюсом карты, вращают номограмму до совмещения изображения альмукантарата со звездой. При этом положении номограммы по южному концу линии *NS* отсчитывают на карте звездное время *s* прохождения звезды через данный альмукантарат, а по сетке вертикалов — азимут звезды *A*.

При составлении эфемерид для наблюдений звезд в любом заданном вертикале на номограмме поднимают этот вертикал карандашом.

Совместив полюс номограммы с полюсом карты, вращают номограмму до совмещения вертикала со звездой. При этом положении номограммы по южному концу линии NS отсчитывают на карте звездное время s прохождения звезды через данный вертикал, а по линиям альмукатаратов — зенитное расстояние звезды z_i .

Точность составления эфемерид по номограмме к звездной карте зависит от величины радиуса экватора звездной карты и от густоты сетки вертикалов и альмукатаратов номограммы.

При радиусе экватора звездной карты $R = 150$ мм и интервалах между альмукантаратами и вертикалами, равных 2° , погрешность получения зенитного расстояния и азимута составляет в среднем $0,3—0,4^\circ$. При поле зрения трубы теодолита, равном 1° , указанная точность составления эфемерид вполне достаточна для производства ночных наблюдений звезд.

- Азимут астрономический 5
 — геодезический 5
 — Лапласа 5
 Азимутальные сдвиги столба 337
 — способы астрономических определений 320
 — способы равных высот 438
 Астрономический теодолит 24
 — теодолит АУ 2/10 25
 — теодолит У-5 29
 — — Вильда Т-4 31
 — теодолит ДКМ-3А 32
 Атомное время 109
 Атомная секунда 109
- Балансир (регулятор) 64
 Боковая рефракция 336
 Боковое гнутие трубы 335
- Вертикальная ось теодолита 27
 Вес уравнений поправок зенитальных способов 173
 — — — азимутальных способов 351
 Влияние наклона горизонтальной оси на горизонтальное направление 322
 — коллимационной ошибки на горизонтальное направление 324
 — погрешностей цапф горизонтальной оси 329
 — бокового гнутия 335
 — внешних источников погрешностей 336
 Всемирное время 107
 Выгоднейшие условия наблюдений 10
 — — — в зенитальных способах 177
 — — — в азимутальных способах 361
- Геодезическая астрономия 5
 Геометрическая интерпретация уравнений поправок зенитальных способов 171
 — — — — азимутальных способов 353
 Гнутие трубы 157
 Графический метод решения уравнений поправок 212
- Двигатель хронометра 70
 Двухстрелочный секундомер 84
 Долгота географическая 8
- Звездная карта в полярной стереографической проекции 576
 Зенит 7
 Зенит-телескоп 43
 Зенитальные способы астрономических определений 150
- Измерение зенитных расстояний светил 150
 — горизонтальных направлений на светила 320
 Импульсная приставка ИТП-2 116
 Исследование хронометра 126
 — астрономического теодолита 128
 — оптических качеств трубы 130
- Классификация зенитальных способов астрономических определений 183
 — азимутальных способов астрономических определений 372
 Контактный микрометр 37, 53
 Контактное устройство хронометра 70
 Координированное время 110
- Линии астрономо-гравиметрического нивелирования 6
 Лично-инструментальная разность 193
 Лично-инструментальное направление 192
- Малогобаритное печатающее устройство МПУ8-3 95
 Международное бюро времени (МБВ) 104
 Метод непосредственного определения дирекционного угла из азимутальных наблюдений светил 375
 Методика приема сигналов координированного времени с помощью двухстрелочного секундомера 51СД 513
 Методика измерения зенитных расстояний светил с помощью оптического теодолита и двухстрелочного секундомера 515
 Микроскоп-микрометр 28, 30
- Номограмма к звездной карте в полярной стереографической проекции 577

- Обоснование выгоднейших условий наблюдений в зенитальных способах 177
- — — в азимутальных способах 361
- Общая теория зенитальных способов 166
- — — азимутальных способов 347
- Окулярный микрометр 27, 29
- Определение азимута из многократных наблюдений ярких звезд в вертикалах, близких к меридиану 411
- — — из наблюдений пар звезд на равных высотах 443
- — — из наблюдений звезд в меридиане 476
- — — по измеренным зенитным расстояниям звезд 534
- — — по измеренному зенитному расстоянию Солнца 536
- — — из многократных наблюдений ярких звезд вблизи первого вертикала 416
- — — направления из наблюдений прохождений звезд в вертикале местного предмета 473
- — — направления на земной предмет по измеренным зенитным расстояниям светил 532
- Определение азимутальной личностно-инструментальной разности 502
- Определение астрономического азимута по измеренному горизонтальному углу между Полярной и местным предметом 416
- — — из наблюдений звезд в элонгации 430
- Определение величины 175
- Определение времени и долготы пункта по измеренным горизонтальным направлениям на n светил вблизи меридиана 431
- Определение долготы (времени) по разности измеренных горизонтальных направлений двух звезд на равных высотах 452
- — — из наблюдений n звезд в вертикале меридианной миры 481
- — — из наблюдений звезд в меридиане с помощью пассажного инструмента 482
- — — из наблюдений южных звезд в вертикалах северных звезд 498
- — — из наблюдений прохождений южных звезд в вертикале Полярной (способ Деллена) 492
- Определение долгот основными пунктами 487
- Определение долготы из наблюдений пар звезд в вертикале меридианной миры 489
- — — по разности измеренных горизонтальных направлений пар звезд в меридиане 491
- — — по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд в вертикалах, близких к меридиану 433
- — — по измеренным горизонтальным направлениям на Полярную и южные звезды 434
- Определение мертвого хода винта и ширины контактов 146
- Определение поправки часов и долготы пункта по измеренным зенитным расстояниям Солнца 526
- Определение расстояний боковых нитей от средней из наблюдений звезд в меридиане 144
- Определение цены оборота окулярного микрометра из наблюдений звезд в элонгации 136
- Определение цены оборота окулярного микрометра из наблюдений звезд в меридиане 142
- Определение широты по измеренным горизонтальным направлениям на n светил вблизи первого вертикала 436
- — — по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд вблизи первого вертикала 437
- — — по разности измеренных горизонтальных направлений двух звезд на равных высотах 448
- — — по измеренным зенитным расстояниям Полярной 518
- — — по измеренным зенитным расстояниям Солнца 521
- — — из наблюдений n звезд в первом вертикале 505
- — — из наблюдений пар звезд в первом вертикале 507
- Определение ширины контактов 146
- Палубные часы 84
- Пассажный инструмент 49
- Параллактический треугольник 8
- Погрешности измерения зенитных расстояний светил 155
- Погрешность визирования 161, 340
- — — определения наклона оси уровня 164, 343
- — — отсчета лимба 163, 342
- Поправка азимута светила за Шк и Мх 380
- — — за ускорение 318
- — — за влияние суточной аберрации 377

- Поправка зенитного расстояния светила за влияние суточной aberrации 185
- Поправки азимута z_1 приведение к МУН 389
- Поправки азимута, широты и долготы за влияние лично-инструментальной разности 381
- — — — за влияние короткопериодических членов нутации 383
- Поправка азимута за высоту наблюдаемого пункта над эллипсоидом 388
- z за ускорение движения светила 186
- Поправка за влияние короткопериодических членов нутации 195
- Поправка за отсчеты микрометров главной и поверительной труб 328
- Поправка Δz , за ширину контактов и мертвый ход 191
- разности шкал УТ1 — УТС 191
- Поправки за отсчеты микрометров главной и поверительной труб 328
- Поправки широты и долготы за приведение к центру знака 387
- — — за приведение к международному условному началу (МУН) 197
- Поправка хронометра 86
- Приближенные астрономические определения широты, долготы и азимута зенитальными способами 513
- — — — — азимутальными способами 539
- Приближенное определение азимута по часовому углу Солнца 562
- Приближенное определение астрономического азимута по часовому углу Полярной 555
- — геодезического азимута из наблюдений светил в разных вертикалах 543
- — — — из наблюдений светил в меридиане 546
- — — — из наблюдений светил в вертикале местного предмета 551
- Приближенные способы астрономических определений 512
- Прибор ЦНИИГАиК для расшифровки хронографической ленты 91
- Призенная астролябия 44
- Редукции наблюдений в зенитальных способах 185
- — в азимутальных способах 377
- Сигналы времени 110
- Служба времени 100
- Случайные погрешности измерений горизонтальных направлений 340
- Совместное определение азимута, широты и долготы из наблюдений групп звезд в плоскостях двух вертикалов 458
- Совместное определение a , φ и λ из наблюдений светил в разных вертикалах и на разных зенитных расстояниях 395
- Совместное определение a , φ и λ из наблюдений светил вблизи плоскостей двух взаимно перпендикулярных вертикалов 407
- Совместное определение a , φ и λ из многократных наблюдений одного и того же светила 410
- Совместное определение широты и долготы по измеренным горизонтальным направлениям на n светил в одном альмукантарате 440
- — — — по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равных высотах 440
- Сомнерова линия 213
- Способ Каврайского 286
- Певцова 305
- Сомнера — Акимова 205
- Струве 218
- Талькотта 233
- Цингера 286
- Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений светил в разных вертикалах и на разных высотах 394
- Способы определения широты по измеренным горизонтальным направлениям на светила вблизи первого вертикала 435
- Способы равных азимутов 457
- Спуск (передаточный механизм) 67
- Суммарная погрешность измерения z 165
- Суммарная случайная погрешность измерения горизонтального направления 345
- Счетчик 68
- Теодолит Т-2 38
- Theo 010 41
- Уклонение отвесной линии условное 171, 172

Уравнение поправок зенитальных
способов 168, 172, 173
— — азимутальных способов 350,
351
Уровень накладной 25, 27
— подвесной 32
— при вертикальном круге 25
— Талькоттовский 25, 27, 30
— рамный 28

Фотоэлектрическая регистрация про-
хождений звезд 60

Ход хронометра 87

Хронограф маркопечатающий ХПМ-3
89
— цифропечатающий 21П 92
Хронометр морской 64
— кварцевый ПКХ-4 72
— кварцевый «Альтаир» 77

Шкалы времени 106

Электромоторный привод для вра-
щения теодолита по азимуту и вы-
соте 56

Эфемеридное время 107

Предисловие	3
Введение	5
§ 1. Предмет и задачи геодезической астрономии	5
§ 2. Общие принципы определения географических координат и азимута направления	7
§ 3. Понятие о зенитальных способах астрономических определений	9
§ 4. Понятие об азимутальных способах астрономических определений	14
§ 5. Понятие об общей теории способов астрономических определений	19

РАЗДЕЛ I

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.

ПЕРЕДАЧА И ПРИЕМ РАДИОСИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ

Глава 1. Астрономические приборы	23
§ 6 Астрономические теодолиты	24
1. Астрономический теодолит АУ 2"/10"	25
2. Астрономический теодолит У 5	29
3. Астрономический теодолит Вильд Т-4	31
4. Астрономический теодолит ДКМ-3А	32
§ 7. Теодолиты средней точности	38
1. Теодолит Т-2	38
2. Теодолит Theo 010	41
§ 8. Зенит-телескоп	43
§ 9 Призменная астролябия	44
§ 10. Пассажный инструмент	49
§ 11. Контактный микрометр	53
§ 12. Электромоторный привод для вращения теодолита по азимуту и высоте	56
§ 13. Метод фотоэлектрической регистрации прохождений звезд	60
Глава 2. Приборы для измерения и регистрации времени. Передача и прием радиосигналов времени	63
§ 14. Хронометр	64
1. Регулятор (маятник)	64
2. Спуск (передаточный механизм)	67
3. Счетчик	68
4. Двигатель	70
5. Контактное устройство	70
6. Правила обращения с хронометром	71
§ 15. Понятие о кварцевых часах. Полевой кварцевый хронометр ПКХ-4	72
§ 16. Экспедиционный кварцевый хронометр «Альтаир»	77
§ 17. Двухстрелочный секундомер и палубные часы	84
§ 18. Поправка и ход хронометра (часов, секундомера). Передача поправки за другие моменты	86
§ 19. Приборы автоматической регистрации времени	89
1. Полевой маркопечатающий хронограф ХПМ-3	89
2. Цифропечатающий хронограф 21П	92

3. Малогабаритное печатающее устройство МПУ8-3	95
§ 20. Служба времени	100
1. Краткая историческая справка о методах определения долгот пунктов и развитии службы времени	100
2. Шкалы времени	106
Всемирное время	107
Эфемеридное время	107
Атомное время	109
Координированное время UTC	110
3. Сигналы времени	110
§ 21. Радиоприемные устройства	114
1. Краткая характеристика радиоприемного устройства Р-311	114
2. Полевой транзисторный приемник «Астра»	117
§ 22. Прием радиосигналов времени	121
§ 23. Исследование хронометров. Оценка качества хронометра	126
Глава 3. Исследования астрономического теодолита	128
§ 24. Общие положения	128
§ 25. Исследование оптических качеств трубы	130
§ 26. Определение цены деления уровня по способу Комстока	131
§ 27. Определение цены оборота окулярного (контактного) микрометра из наблюдений звезд в элонгации	136
§ 28. Определение цены оборота окулярного (контактного) микрометра из наблюдений звезд в меридиане	142
§ 29. Определение расстояний боковых нитей от средней из наблюдений звезд в меридиане	144
§ 30. Определение мертвого хода винта и ширины контактов головки контактного микрометра	146

РАЗДЕЛ II

ЗЕНИТАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Глава 4. Измерение зенитных расстояний светил	150
§ 31. Особенности измерения зенитных расстояний светил	150
§ 32. Погрешности измерения зенитных расстояний светил, обусловленные влиянием инструментальных погрешностей	155
1. Влияние наклона горизонтальной оси и коллимационной ошибки на измеряемое зенитное расстояние	155
2. Гнутие трубы прибора; погрешности делений вертикального круга	157
§ 33. Погрешности измерения зенитных расстояний светил, обусловленные влиянием случайных погрешностей наблюдений	160
1. Случайная погрешность визирования и ее влияние на измеренное зенитное расстояние светила	160
2. Погрешность отсчета вертикального лимба	163
3. Погрешность определения наклона оси уровня	164
4. Остаточное влияние рефракции и гнутия	164
5. Суммарная случайная погрешность измерения зенитного расстояния светила	165
Глава 5. Общая теория зенитальных способов астрономических определений	166
§ 34. Постановка и решение общей задачи	166
1. О точности дифференциальных формул	169
§ 35. Геометрическая интерпретация уравнивания поправок зенитальных способов	171
§ 36. О весах уравнений поправок зенитальных способов	173
§ 37. Решение уравнений поправок и оценка точности уравненных значений определяемых величин	175

§ 38.	Обоснование выгоднейших условий наблюдений в зенитальных способах астрономических определений	177
§ 39.	Классификация зенитальных способов астрономических определений	183
§ 40.	Редукции наблюдений в зенитальных способах	185
1.	Поправка зенитного расстояния светила за влияние суточной аберрации	185
2.	Поправка зенитного расстояния, вычисленного со средним моментом, за ускорение движения светила	186
3.	Поправка за ширину контактов и мертвый ход винта контактного микрометра	191
4.	Поправка разности шкал координированного времени UTC и всемирного времени UT1	191
5.	Лично-инструментальное уравнение и его влияние на уравненные значения определяемых величин	192
6.	Поправки за влияние короткопериодических членов нуляции	195
7.	Поправки широты и долготы за приведение к центру знака	196
8.	Поправки широты и долготы за приведение к «среднему полюсу» — международному условному началу	197
§ 41.	О точности зенитальных способов астрономических определений	198
Глава 6.	Способы определения широты и долготы по измеренным зенитным расстояниям светил	205
§ 42.	Совместное определение широты и долготы по измеренным зенитным расстояниям светил в разных вертикалах (способ Сомнера—Акимова)	205
1.	Общие положения	205
2.	Наблюдения	207
3.	Обработка наблюдений	209
§ 43.	Определение широты по измеренным зенитным расстояниям пар звезд вблизи меридиана (способ Струве)	218
1.	Теория способа	218
2.	Подготовка к наблюдениям. Составление рабочих эфемерид пар звезд	221
3.	Наблюдения	224
4.	Обработка наблюдений	228
§ 44.	Определение широты по измеренным малым разностям зенитных расстояний пар звезд в меридиане (способ Талькотта)	231
1.	Общие положения	231
2.	Особенности вычисления поправок за рефракцию, ускорение движения звезд по зенитному расстоянию и за коллимацию; поправка за наклон подвижной нити микрометра	234
	Поправка за рефракцию	234
	Поправка за ускорение зенитного расстояния звезды, вычисленного со средним моментом наблюдения	235
	Поправка за влияние коллимации	236
	Суммарное влияние поправки за ускорение и поправки за коллимацию	237
	Поправка за наклон подвижной нити микрометра	239
3.	Подготовка к наблюдениям. Составление рабочих эфемерид пар звезд	240
4.	Наблюдения	242
	Наблюдения звезд в произвольных малых часовых углах	242
	Наблюдения звезд на постоянных вертикальных нитях	244
5.	Вычисление широты	248
6.	Уравнивание широт, наблюденных на пункте; оценка точности определения широты	252

§ 45.	Определение широты по измеренным малым разностям зенитных расстояний пар ярких звезд вблизи меридиана	256
§ 46.	Понятие о способах определения долготы (времени) по измеренным зенитным расстояниям светил	259
1.	Определение долготы (времени) по измеренным зенитным расстояниям n звезд в первом вертикале	259
2.	Определение долготы (времени) по измеренным зенитным расстояниям пар звезд в первом вертикале	260
Глава 7.	Способы определения широты и долготы из наблюдений звезд на равных высотах (Способы равных высот).	262
§ 47.	Совместное определение широты и долготы из наблюдений n звезд в одном альмукантарате	264
1.	Общие положения	264
2.	Особенности наблюдений звезд с контактным микрометром	265
3.	Влияние коллимации на зенитное расстояние светила	267
4.	Влияние наклона подвижной нити	269
5.	Составление рабочих эфемерид. Подготовка к наблюдениям	271
6.	Наблюдения	274
7.	Обработка наблюдений	275
8.	Вывод окончательных значений широты и долготы пункта из наблюдений k серий звезд. Оценка точности	283
§ 48.	Понятие о совместном определении широты и долготы из наблюдений пар звезд на равных высотах	285
§ 49.	Определение долготы (времени) из наблюдений пар звезд на равных высотах. Способ Цингера	286
1.	Теория способа	286
2.	О составлении рабочих эфемерид пар звезд	291
3.	Наблюдение пар Цингера	293
4.	Формулы для вычисления y из наблюдений пар звезд с учетом необходимых поправок	296
5.	Обработка наблюдений	300
6.	Вывод окончательного значения долготы пункта. Оценка точности	303
§ 50.	Определение широты из наблюдений пар звезд на равных высотах. Способ Певцова	305
1.	Теоретические основания способа	305
2.	Составление рабочих эфемерид	309
3.	Наблюдения	311
4.	Формулы для вычисления широты с учетом необходимых поправок	314
5.	Вычисление широты пункта. Оценка точности	317

РАЗДЕЛ III

АЗИМУТАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Глава 8.	Измерение горизонтальных направлений на светила	320
§ 51.	Особенности измерения горизонтальных направлений на светила	320
§ 52.	Влияние наклона горизонтальной оси прибора на измеряемое горизонтальное направление	322
§ 53.	Влияние коллимационной ошибки на измеряемое горизонтальное направление	324
§ 54.	Поправки за отсчеты окулярных микрометров главной и поверительной труб	328
§ 55.	Влияние погрешностей формы цапф горизонтальной оси	329
§ 56.	Влияние бокового гнутия трубы	335
§ 57.	О влиянии внешних источников погрешностей	336
1.	Боковая рефракция	336

	2. Температурное воздействие среды и наблюдателя на различные части теодолита	337
	3. Азимутальные сдвиги столба (столика сигнала)	338
§ 58.	Погрешности измерения горизонтального направления (угла), обусловленные влиянием случайных погрешностей наблюдений	340
	1. Влияние случайной погрешности визирования	340
	2. Погрешность отсчета горизонтального круга	342
	3. Погрешность в определении наклона горизонтальной оси	343
	4. Суммарная случайная погрешность измерения горизонтального направления	345
Глава 9.	Общая теория азимутальных способов астрономических определений	347
§ 59.	Постановка задачи	347
§ 60.	Вес уравнения поправок	351
§ 61.	Геометрическая интерпретация уравнений поправок для азимутальных способов	353
§ 62.	Решение уравнений поправок. Оценка точности	358
§ 63.	Обоснование выгоднейших условий наблюдений. Общие соображения о методике вычислений в азимутальных способах астрономических определений	361
§ 64.	Классификация азимутальных способов астрономических определений	372
§ 65.	Метод непосредственного определения дирекционного угла направления на земной предмет из азимутальных наблюдений светил	375
§ 66.	Редукции азимутальных наблюдений светил	377
	1. Поправка азимута светила за влияние суточной аберрации	377
	2. Поправка азимута светила, вычисленного со средним моментом наблюдений, за ускорение	378
	3. Поправка азимута светила за ширину контактов и мертвый ход винта контактного микрометра	380
	4. Поправки уравненных значений азимута, широты и долготы за влияние лично-инструментальной разности	381
	5. Поправки уравненных значений азимута, широты и долготы за влияние короткопериодических членов нутации	383
	6. Приведение азимута направления к центрам геодезических знаков	387
	7. Поправка азимута за высоту наблюдаемого пункта над поверхностью эллипсоида (сфериодическая поправка)	388
	8. Приведение азимута к «среднему полюсу» в системе МУН	389
§ 67.	О точности азимутальных способов астрономических определений	389
Глава 10.	Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений светил в разных вертикалах и на разных зенитных расстояниях	394
§ 68.	Совместное определение азимута, широты и долготы из наблюдений светил в разных вертикалах и на разных зенитных расстояниях	395
	1. Теоретические основы способа	395
	2. Наблюдения	396
	3. Обработка наблюдений	400
§ 69.	Совместное определение азимута, широты и долготы из наблюдений светил вблизи плоскостей двух взаимно перпендикулярных вертикалов	407
§ 70.	Совместное определение азимута, широты и долготы (a_r , ξ и η) из многократных наблюдений одного и того же светила	410

71.	Определение азимута направления из наблюдений ярких звезд в разных вертикалах	411
§ 72.	Определение азимута из многократных наблюдений ярких звезд в вертикалах, близких к меридиану	411
§ 73.	Определение азимута из многократных наблюдений ярких звезд вблизи первого вертикала	416
§ 74.	Определение астрономического азимута по измеренному горизонтальному углу между Полярной и местным предметом	416
1.	Теория способа	416
2.	Наблюдения	419
3.	Обработка журнала наблюдений	426
4.	Вычисление азимута направления на земной предмет.	427
§ 75.	Понятие об определении астрономического азимута из наблюдений звезд в элонгации	430
§ 76.	Определение времени и долготы пункта по измеренным горизонтальным направлениям на n светил вблизи меридиана	431
§ 77.	Определение долготы по разности измеренных горизонтальных направлений пар звезд в вертикалах, близких к меридиану	433
§ 78.	Определение времени (долготы) по измеренным горизонтальным направлениям на Полярную и южные звезды (Способ Струве)	434
§ 79.	Способы определения широты по измеренным горизонтальным направлениям на светила вблизи первого вертикала	435
1.	Определение широты по измеренным горизонтальным направлениям на n светил вблизи первого вертикала.	436
2.	Определение широты по разности измеренных горизонтальных направлений пар звезд вблизи первого вертикала	437
Глава 11.	Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений звезд на равных высотах (азимутальные способы равных высот)	438
§ 80.	Совместное определение азимута, широты и долготы по измеренным горизонтальным углам между местным предметом и светилами в одном альмукантарате	439
§ 81.	Совместное определение широты и долготы по измеренным горизонтальным направлениям на n светил в одном альмукантарате.	440
§ 82.	Совместное определение широты и долготы по разностям измеренных горизонтальных направлений пар звезд на равных высотах	440
§ 83.	Определение азимута направления из наблюдений пар звезд на равных высотах	443
§ 84.	Определение широты по разности измеренных горизонтальных направлений двух звезд на равных высотах.	448
§ 85.	Определение долготы (времени) по разности измеренных горизонтальных направлений двух звезд на равных высотах.	452
Глава 12.	Способы определения азимута, широты и долготы из наблюдений групп звезд в плоскости одного вертикала (способы равных азимутов)	457
§ 86.	Совместное определение азимута, широты и долготы из наблюдений групп звезд в плоскостях двух вертикалов.	458
§ 87.	Определение азимута направления из наблюдений прохождений звезд в вертикале местного предмета.	473
§ 88.	Определение азимута направления на земной предмет из наблюдений звезд в меридиане	476
§ 89.	Определение долготы (времени) из наблюдений n звезд в вертикале меридианной миры	481

§ 90. Определение времени (долготы) из наблюдений n звезд в меридиане с помощью пассажного инструмента	482
1. Сущность способа с позиций общей теории	482
2. Обработка наблюдений классическим способом	484
§ 91. Об определении долгот основных пунктов	487
§ 92. Определение долготы из наблюдений пар звезд в вертикале меридианной мира	489
§ 93. Определение долготы по разности измеренных горизонтальных направлений пар звезд в меридиане	491
§ 94. Определение поправки хронометра и долготы из наблюдений прохождений южных звезд в вертикале Полярной (способ Деллена)	492
§ 95. Определение времени (долготы) из наблюдений южных звезд в вертикалах северных звезд	498
§ 96. Об определении азимутальной лично-инструментальной разности	502
§ 97. Определение широты из наблюдений n звезд в первом вертикале	505
§ 98. Определение широты из наблюдений пар звезд в первом вертикале	507

РАЗДЕЛ IV
ПРИБЛИЖЕННЫЕ СПОСОБЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ
ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Глава 13. Приближенные астрономические определения широты, долготы и азимута зенитальными способами	513
§ 99. Особенности совместного определения широты и долготы способом Сомнера с помощью оптического теодолита и двухстрелочного секундомера	513
1. Методика приема сигналов координированного времени с помощью двухстрелочного секундомера	513
2. Методика измерения зенитных расстояний светил с помощью оптического теодолита и двухстрелочного секундомера	515
3. Обработка наблюдений	517
§ 100. Определение широты по измеренным зенитным расстояниям Полярной звезды	518
§ 101. Определение широты по измеренным зенитным расстояниям Солнца	521
1. Теоретические основы способа	521
2. Наблюдения и вычисления	524
§ 102. Определение поправки часов и долготы пункта по измеренным зенитным расстояниям Солнца	526
§ 103. Определение азимута направления на земной предмет по измеренным зенитным расстояниям светил	532
1. Теоретические основы способа	532
2. Определение азимута направления по измеренным зенитным расстояниям звезд	534
3. Определение азимута направления по измеренному зенитному расстоянию Солнца	536
Глава 14. Приближенные астрономические определения азимута, широты и долготы азимутальными способами	539
§ 104. Особенности совместных определений азимута, широты и долготы по измеренным горизонтальным углам между светилами и местным предметом	539
§ 105. Особенности определения геодезического азимута из наблюдений светил в разных вертикалах	543

§ 106. Определение геодезического азимута из наблюдений звезд в меридиане с помощью оптического теодолита и двухстрелочного секундомера	546
§ 107. Определение геодезического азимута из наблюдений звезд в вертикале местного предмета с помощью оптического теодолита и двухстрелочного секундомера	551
§ 108. Определение астрономического азимута по часовому углу Полярной	555
§ 109. Определение азимута по часовому углу Солнца	562
Список литературы	570
Приложение 1. Таблица коэффициентов m и n для вычисления $\frac{d^2z}{dt^2}$	574
Приложение 2. Таблица коэффициентов k_1 и k_2 для вычисления $\frac{d^2A}{dt^2}$	575
Приложение 3. Звездная карта в полярной стереографической проекции	576
Приложение 4. Номограмма к звездной карте в полярной стереографической проекции	577
Предметный указатель	581

СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ УРАЛОВ

КУРС ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

Редактор издательства Н. В. Протопопова
 Переплет художника К. В. Голикова
 Художественный редактор Е. Л. Юрковская
 Технические редакторы: Л. Г. Лаврентьева, А. Г. Иванова
 Корректоры: Р. Т. Баканова, К. И. Савенкова

ИБ № 2723

Сдано в набор 03.01.80. Подписано в печать 19.05.80. Т-08069.
 Формат 60×90^{1/16}. Бумага кн.-журнальная. Гарнитура «Литературная». Печать высокая.
 Усл. печ. л. 37,0. Уч.-изд. л. 37,51. Тираж 6200. Заказ 12/7070—15. Цена 1 р. 60 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени
 Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
 по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
 193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.