

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ (МИИГАиК)

КАФЕДРА ВЫСШЕЙ ГЕОДЕЗИИ

Шануров Геннадий Анатольевич
Вшивкова Ольга Владимировна

УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ТРОПОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ
РАССТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ДАЛЬНОМЕРОМ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КЛАССА.
РАБОТА С МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ

Учебное пособие

*Текст лекций и методические указания
для студентов геодезических специальностей*

Москва 2016

Оглавление	
Введение.....	3
1. Принципы измерения метеорологических параметров и аналитические соотношения	4
1.1. Метеорологические параметры	6
1.2. Вычисление индекса преломления воздуха для ультракоротких радиоволн	7
1.3. Вычисление индекса преломления воздуха для световых волн.....	7
1.4. Измерение температуры воздуха и определение парциального давления водяных паров.....	9
1.5. Измерение давления воздуха	12
2. Влияние ошибок определения метеорологических параметров на ошибку измерения расстояния	15
2.1. Влияние ошибок определения метеорологических параметров на ошибку измерения расстояния в диапазоне ультракоротких радиоволн	17
2.2. Влияние ошибок определения метеопараметров на ошибку измерения расстояния в световом диапазоне	19
3. Необходимая точность определения метеорологических параметров.....	20
4. Методика определения метеорологических параметров	23
5. Выполнение лабораторной работы	28
5.1. Отсчитывание показаний метеоприборов	28
5.2. Вычисление индекса преломления воздуха и рабочей скорости для ультракоротких радиоволн и для световых волн.....	28
5.3. Вычисление метеопоправки в результаты светодальномерных измерений.....	30
5.4. Отчётность по работе.....	31
Заключение	32
Литература	33

Введение

Термин «рабочая скорость распространения электромагнитных волн» относится к области измерения расстояний между пунктами опорной геодезической сети электронными дальномерами. Эти измерения выполняют тогда, когда опорную геодезическую сеть создают наземными (не спутниковыми) методами: методом трилатерации, методом полигонометрии для измерения длин сторон полигонометрического хода, методом триангуляции для измерения длин базисных сторон. Рабочая скорость распространения электромагнитных волн, которую будем далее называть просто «рабочая скорость» - это скорость распространения электромагнитных волн в приземном слое атмосферы, то есть в тропосфере, на момент (время, период, эпоху) выполнения измерений электронным дальномером. Значение рабочей скорости получают из результатов определения параметров атмосферы (тропосферы): температуры воздуха, давления воздуха и влажности воздуха. Эти параметры тропосферы называют метеорологическими параметрами - метеопараметрами. Далее использован именно этот термин.

В современной практике наземные методы создания опорных геодезических сетей в значительной мере потеснены спутниковым методом. Другими словами, основной объем наблюдений выполняют геодезическими спутниковыми приемниками ГЛОНАСС и GPS Navstar. Это не означает, что высокоточные дальномерные измерения, сопровождающиеся измерениями метеопараметров, вытеснены из практики геодезических измерений полностью. Наиболее точные электронные геодезические дальномеры - фазовые светодальномеры - позволяют определять расстояния длиной в несколько километров с ошибкой, лежащей в пределах одной десятой миллиметра. Такой уровень точности пока не достигнут спутниковым

методом. Именно по этой причине метрологические полигоны, создаваемые для метрологической аттестации спутниковой аппаратуры и ее программного обеспечения, в своей основе имеют геодезические сети, стороны которых измерены высокоточными геодезическими дальномерами.

Определение метеопараметров является неотъемлемой частью высокоточных дальномерных измерений в опорной геодезической сети, создаваемой наземными методами. Программное обеспечение, используемое для обработки результатов геодезических спутниковых наблюдений, также включает возможность ввода метеопараметров, определенных на пунктах опорной геодезической сети, где установлены спутниковые приемники, в качестве результатов измерений. Следовательно, процедура определения метеопараметров является составной частью создания опорной геодезической сети с использованием как наземных, так и спутниковых методов измерений. Поэтому необходимо в процессе обучения дать студентам возможность получить навыки работы с метеорологическими приборами - с метеоприборами.

1. Принципы измерения метеорологических параметров и аналитические соотношения

Основная формула дальнометрии, по которой вычисляют измеренное электронным дальномером расстояние D , имеет вид [1]:

$$D = \frac{V \cdot \tau}{2} . \quad (1.1)$$

В этой формуле V - значение рабочей скорости распространения электромагнитной волны; τ - интервал времени, в течение которого электромагнитное колебание проходит измеряемую дистанцию в прямом и в обратном направлениях.

Значение V рабочей скорости связано со значением C скорости распространения электромагнитной волны в вакууме соотношением:

$$V = \frac{C}{n} . \quad (1.2)$$

В этой формуле $C = 299\,792\,458$ м/с - это принятая международным соглашением фундаментальная геодезическая (физическая, астрономическая) постоянная. Величина n - это показатель преломления воздуха для электромагнитной волны. Поскольку значение C является эталонным, то есть не содержит ошибки, проблема определения рабочей скорости V сводится к определению значения n показателя преломления воздуха для электромагнитной волны.

Значение показателя преломления воздуха в тропосфере для световых волн и для радиоволн близко к единице. Например, это значение может быть равным 1,000295, то есть $n = 1,000295$. Три последних цифры после запятой в этом примере в конкретных метеоусловиях меняются, но единица перед запятой и три нуля после запятой присутствуют всегда. Другими словами, численное значение показателя преломления n определяется только тремя стоящими после запятой последними цифрами. Эти три последние цифры обозначают буквой N и называют индексом преломления воздуха для электромагнитной волны. Индекс преломления воздуха представляет собой отклонение показателя преломления воздуха от единицы, выраженное в единицах шестого знака после запятой. Величины N и n связаны соотношениями:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6, \quad (1.3)$$

$$n = 1 + (N) \cdot 10^{-6} . \quad (1.4)$$

Таким образом, если известно значение n , то по формуле (1.3) можно вычислить значение N . И наоборот, если известно значение N , то по формуле

(1.4) можно вычислить значение n . Поскольку существует такое однозначное соответствие, то принято давать формулы именно для индекса преломления.

Как видно из формулы (1.2), показатель преломления - это величина безразмерная. Следовательно, в соответствии с формулой (1.3), индекс преломления - это тоже величина безразмерная. Однако принято говорить и писать, что индекс преломления выражен в N -единицах. В приведенном выше численном примере индекс преломления равен 295-и N -единицам. Можно также сказать, что показатель преломления отличается от единицы на 295 N -единиц или на 295 единиц шестого знака после запятой.

1.1. Метеорологические параметры

Метеопараметры - это температура, давление и влажность воздуха. В Российской Федерации общепринято выражать температуру в градусах Цельсия. Температуру обозначают $t^{\circ}\text{C}$ или просто t° . В формулах же, используемых для вычисления индекса преломления воздуха в геодезической дальнометрии, используют абсолютную температуру, то есть температуру воздуха выражают в градусах Кельвина. В этом случае температуру обозначают $T^{\circ}\text{K}$ или просто T° . Значения температуры, выраженной в градусах Кельвина и в градусах Цельсия, связаны соотношением:

$$T^{\circ} = t^{\circ} + 273^{\circ},15. \quad (1.5)$$

Давление воздуха P складывается из давления p смеси газов, входящих в состав воздуха, и из давления e водяных паров, растворенных в этой смеси газов:

$$P = p + e. \quad (1.6)$$

Давление P воздуха еще называют полным давлением воздуха. Именно это давление определяют с помощью барометра. Давление p называют парциальным давлением смеси сухих газов. Давление e называют парциальным давлением водяных паров. Эту величину для краткости и

называют влажностью воздуха. Влажность воздуха определяют с помощью психрометра.

1.2. Вычисление индекса преломления воздуха для ультракоротких радиоволн

В спутниковых системах глобального позиционирования ГЛОНАСС и GPS Navstar длины волн несущих колебаний, излучаемых спутниками, равны примерно двадцати сантиметрам, то есть лежат в ультракоротковолновом (УКВ) диапазоне. Можно также сказать, что спутники излучают колебания, лежащие в диапазоне сверхвысоких частот - в СВЧ-диапазоне. В этом же диапазоне работали и радиодальномеры, ныне вытесненные из производства спутниковыми приемниками. Индекс преломления $N_{\text{рад}}$ воздуха для ультракоротких радиоволн вычисляют по формуле Фрума и Эссена [1-3]:

$$N_{\text{рад}} = a \frac{P}{T} + b \frac{e}{T} + c \frac{e}{T^2} . \quad (1.7)$$

В этой формуле температура T воздуха выражена в градусах Кельвина. Давление P воздуха выражено в миллиметрах ртутного столба - мм. рт. ст.; влажность воздуха e также выражена в миллиметрах ртутного столба; Коэффициенты, входящие в формулу, имеют следующие значения: $a = 103,49$; $b = -17,23$; $c = 496000$. Давление и влажность воздуха выражают также в миллибарах (гектопаскалях). В этом случае значения коэффициентов будут иными: $a = 77,63$, $b = 12,92$, $c = 371914$.

1.3. Вычисление индекса преломления воздуха для световых волн

Из содержания предшествующего подраздела 1.2 видно, что процедура вычисления индекса преломления воздуха для УКВ-радиоволн включает только один этап - вычисление по формуле 1.7. Процедура вычисления индекса преломления воздуха для световых волн более сложна - она

включает два этапа. Это вызвано тем, что индекс преломления воздуха для световых волн зависит не только от метеопараметров. Он зависит также от длины волны λ света. Эту зависимость (этот эффект) называют дисперсией. Существуют два понятия индекса преломления воздуха для световых волн [1-3]: фазовый индекс преломления и групповой индекс преломления. При обработке результатов светодальномерных измерений используют именно групповой индекс преломления $N_{гр}$.

На первом этапе вычисляют значение $N_{гр}^0$ группового индекса преломления в стандартных метеоусловиях. Международным стандартным метеоусловиям соответствует температура $T_0 = 288,15$ К, или $t_0 = 15^0$ С; давление $P_0 = 760$ мм рт. ст.; парциальное давление водных паров (влажность воздуха) $e_0 = 0$ мм рт. ст. - абсолютно сухой воздух. Для вычисления индекса преломления в стандартных метеоусловиях используют *формулу Коши* [1-3]:

$$N_{гр}^0 = A_0 + \frac{3B_0}{\lambda^2} + \frac{5C_0}{\lambda^4} \quad . \quad (1.8)$$

В этой формуле длина волны λ света выражена в микрометрах, то есть в тысячных долях миллиметра. Дисперсионные коэффициенты имеют следующие значения:

$$A_0 = 287,583; B_0 = 1,6134; C_0 = 0,01367. \quad (1.9)$$

Групповой индекс преломления воздуха для световых волн при температуре T воздуха, выраженной в градусах Кельвина, при давлении P воздуха и при парциальном давлении e водяных паров (влажности воздуха), выраженных в миллиметрах ртутного столба, вычисляют по *формуле Баррела и Сирса* [1-3]:

$$N_{гр} = N_{гр}^0 \frac{T_0}{P_0} \cdot \frac{P}{T} - \left(17.045 - \frac{0.56}{\lambda^2} \right) \cdot \frac{e}{T} \quad . \quad (1.10)$$

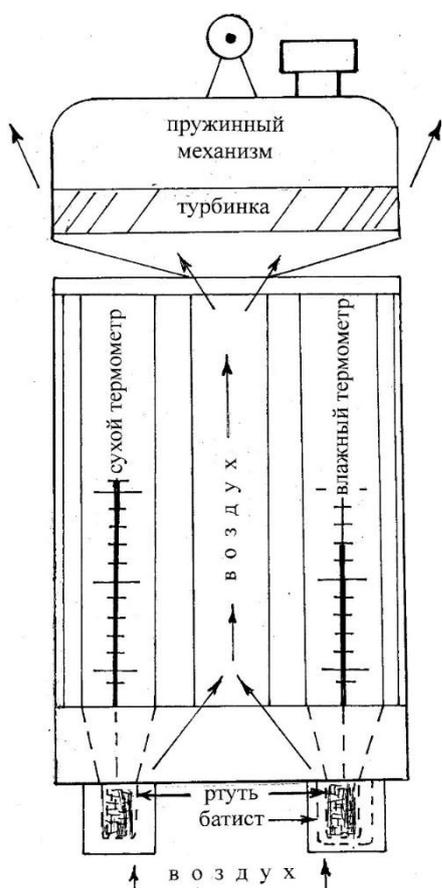
В этой формуле, как написано ранее, $T_0 = 288^{0},15 \text{ К}$, $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$

1.4. Измерение температуры воздуха и определение парциального давления водяных паров

Температуру воздуха, также как и парциальное давление водяных паров (влажность воздуха), определяют с помощью аспирационного психрометра Ассмана. Внешний вид психрометра приведён на рисунке 1.1, [devicesearch.ru].



Рисунок 1.1. Психрометр Ассмана.



Устройство психрометра иллюстрирует рисунок 1.2. рисун
ок 1.2.

Психрометр состоит из двух ртутных термометров и аспирационного механизма. Цена деления каждого термометра - две десятых градуса. Термометры заключены в блестящую хромированную оправу. Сделано это для того, чтобы по возможности уменьшить нагревание термометров тепловыми лучами.

Аспирационный механизм состоит из пружинного устройства с заводным ключом и из турбинки (крыльчатки). Резервуар со ртутью одного из термометров обмотан гигроскопичной материей - батистом. Перед началом измерения метеопараметров, примерно за четыре минуты, батистовую тряпочку смачивают дистиллированной водой. Допускается использовать дождевую или талую воду. Смачивают тряпочку с помощью специальной пипетки. Набрав воду в пипетку, ее переворачивают отверстием вверх и нажимают на резиновый резервуар так, чтобы вышли воздушные пузырьки и начала литься вода. После этого надевают стеклянную трубочку пипетки на резервуар со ртутью, обмотанный батистовой тряпочкой (по диаметру все подходит). Затем одновременным движением пипетку убирают и отпускают резиновый резервуар пипетки. Таким образом отсасывают капли воды с батистовой тряпочки. Тряпочка должна остаться влажной, но не мокрой. Именно при таких условиях психрометр эталонировали. И именно по этой причине термометр с батистовой тряпочкой называют влажным (а не мокрым) термометром. Другой же термометр в противоположность влажному термометру назвали сухим термометром. Показание сухого термометра обозначают t_c . Показание влажного термометра обозначают t_v .

После того, как батистовая тряпочка влажного термометра смочена, заводят пружину аспирационного механизма. Турбинка аспирационного механизма начинает вращаться и протягивает воздух вдоль термометров. Этот процесс и называют аспирацией. Такое протягивание воздуха необходимо для того, чтобы показания термометров соответствовали именно окружающей среде, а не только тому воздуху, который скопился непосредственно вокруг термометров. Первый отсчет можно выполнять только после того, как показания по обоим термометрам перестали меняться - установились. Отсчет берут до целых делений, то есть до двух десятых градуса, не оценивая доли деления на глаз. Психрометр должен быть подвешен в двух-трех метрах в стороне от дальнометра в тени примерно на

высоте прибора. Нельзя дышать на психрометр. Желательно во время отсчета не касаться психрометра. При необходимости можно ненадолго взять его за верхнюю часть - за чехол пружинного механизма.

Показание влажного термометра никакой поправкой не исправляют. Показание же сухого термометра, для того, чтобы привести его к международной температурной шкале, исправляют шкаловой поправкой. Таблица со шкаловыми поправками сухого термометра содержится в паспорте психрометра. Далее в качестве примера приведена выдержка из такой таблицы.

Таблица 1.1.

Шкаловая поправка в показания сухого термометра за приведение к международной температурной шкале

t_c	0°C	$+10^{\circ}\text{C}$	$+20^{\circ}\text{C}$	$+30^{\circ}\text{C}$	$+40^{\circ}\text{C}$
Поправка	-0,14	-0,05	-0,07	-0,12	-0,07

Показание t_c сухого термометра, исправленное шкаловой поправкой, и есть температура t окружающего воздуха, которую используют в дальнейших вычислениях.

Величину e парциального давления водяных паров (влажность воздуха) вычисляют по формуле Шпрунга [1-3]:

$$e = E - \frac{P}{k} (t_c - t_b) \quad . \quad (1.11)$$

В этой формуле:

t_c - показание сухого термометра, исправленное шкаловой поправкой;

t_b - показание влажного термометра;

P - давление воздуха; об определении давления воздуха написано в следующем подразделе 1.5;

E – давление насыщения, то есть, давление водяного пара при стопроцентной (100%) влажности воздуха; эту величину выбирают из

приведенной далее психрометрической таблицы 1.2 по аргументу t_b показания влажного термометра;

k - (полуэмпирическая, отчасти теоретическая, отчасти полученная опытным путем) величина, которую также выбирают из приведенной далее психрометрической таблицы 1.2 по аргументу t_b показания влажного термометра.

Интервал температур, приведенных в этой таблице, достаточен для использования студентами, которые выполняют лабораторные работы. Психрометрические таблицы, содержащие больший интервал температур, приведены в работах [1,3,6].

Таблица 1.2.

Психрометрическая таблица для определения давления насыщения E и величины k по показаниям влажного термометра аспирационного психрометра Ассмана

t_b °C	E мм рт.ст.	k °C	t_b °C	E мм рт.ст.	k °C
+10	9,21	1492	+17	14,53	1480
+11	9,84	1490	+18	15,48	1479
+12	10,52	1489	+19	16,48	1477
+13	11,23	1487	+20	17,54	1475
+14	11,99	1485	+21	18,65	1474
+15	12,79	1484	+22	19,82	1472
+16	13,63	1482	+23	21,07	1470

1.5. Измерение давления воздуха

Давление P воздуха измеряют с использованием барометра-анероида. Фотография барометра-анероида приведена на рисунке 1.3, [meddr.ru]. Шкала барометра-анероида проградуирована через один миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.). Формулы (1.7), (1.10) и (1.11) и входящие в них числовые величины даны так, что давление воздуха выражено именно в миллиметрах

ртутного столба (в торах). Существуют барометры-анероиды, шкала которых проградуирована в миллибарах (гектопаскалях). Между этими единицами измерения давления существует следующая связь. 760 мм рт. ст. = 1013,25 мбар; 1 мм рт. ст. = 1,33 мбар; 1 мбар = 0,75 мм рт. ст.

Большие штрихи на шкале барометра-анероида подписаны через десять миллиметров ртутного столба: ... 73, 74, 75, 76 Подпись 74 означает 740 миллиметров ртутного столба (мм рт. ст.). Расстояние между подписанными большими штрихами разделено маленькими штрихами на десять интервалов. Цена деления равна одному миллиметру ртутного столба. Отсчёт берут, отсчитывая десятые доли деления шкалы на глаз. Таким образом давление воздуха отсчитывают до одной десятой миллиметра ртутного столба. На шкале расположено зеркальное кольцо, в котором отражается стрелка барометра-анероида. Это зеркальное кольцо нужно для того, чтобы исключить влияние параллакса на результат отсчитывания. Отсчитывать следует, глядя на шкалу перпендикулярно, так, чтобы стрелка совпадала со своим отражением в зеркальном кольце.

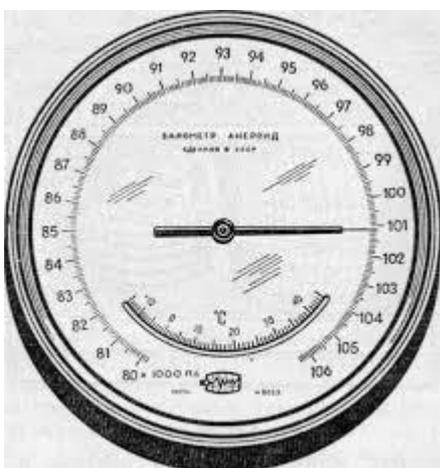


Рисунок 1.3. Барометр-анероид

Следует понимать, что отсчёт P' по шкале барометра-анероида не есть в точности значение P давления воздуха. Чтобы получить значение P давления воздуха, необходимо в отсчет P' по шкале барометра ввести три поправки: добавочную (постоянную) поправку K_d , температурную поправку K_t и шкаловую

поправку $K_{ш}$. Таким образом, значение P давления воздуха вычисляют по отсчёту P' , используя формулу:

$$P = P' + K_d + K_t + K_{ш}. \quad (1.12)$$

Температурную поправку вычисляют по формуле:

$$K_t = k_t t + 0,0002(750 - P')(t - 20). \quad (1.13)$$

Значение температурного коэффициента k_t , также как значения остальных характеристик барометра-анероида, выбирают из его паспорта. Образец паспорта приведён ниже.

Таблица 1.3

ПАСПОРТ БАРОМЕТРА-АНЕРОИДА МД-49-2

Температурный коэффициент $k_t = -0,05$ мм. рт. ст. на $1^{\circ}C$.
Добавочная поправка $K_d = +0,7$ мм. рт. ст.

Шкаловая поправка при температуре $t = 0^{\circ}C$.

Показание P' мм рт. ст.	Шкаловая поправка $K_{ш}$ мм рт. ст.
740	+0,4
750	+0,3
760	0,0
770	-0,2
780	-0,2
790	-0,1

В формуле (1.13) t - это температура чувствительной к изменениям давления воздуха системы барометра-анероида. Барометры-анероиды некоторых типов содержат термометр, который показывает температуру именно чувствительной системы барометра-анероида. Шкала такого термометра расположена на шкале барометра-анероида. Однако большинство барометров-анероидов не имеют такого термометра. Поэтому в качестве температуры t чувствительной системы барометра-анероида используют температуру окружающего воздуха, то есть показание t_c сухого термометра, исправленное шкаловой поправкой. Необходимо, чтобы чувствительная

система барометра-анероида приняла температуру окружающего воздуха. Другими словами, перед тем, как выполнить отсчет по шкале барометра-анероида необходимо, чтобы прошло минут 10-20 с того момента, как барометр был расчехлён и установлен на пункте. Такой же выдержки требует и психрометр.

2. Влияние ошибок определения метеорологических параметров на ошибку измерения расстояния

Подставим формулу (1.4) в формулу (1.2), результат подставим в формулу (1.1), получим выражение для зависимости дифференциала dD расстояния D от дифференциала dN индекса N преломления воздуха. От дифференциалов dD и dN перейдём к соответствующим ошибкам δ_D и δ_N . В результате получим формулу, связывающую ошибку в определении расстояния с ошибкой в значении индекса преломления воздуха:

$$\delta_D = -D(\delta_N) \cdot 10^{-6} \quad (2.1)$$

Смысл этого выражения состоит в следующем. Если при определении индекса преломления допущена ошибка в одну N -единицу, то это вносит ошибку в результат определения расстояния, равную одной миллионной от длины этого расстояния. Например, если расстояние равно 10 километрам, то ошибка равна 1 сантиметру, если расстояние равно 20 километрам, то ошибка равна 2 сантиметрам. Ошибка пропорциональна длине измеряемой линии. В опорных геодезических сетях расстояния между пунктами составляют десятки километров. Следовательно, ошибка в оценке влияния атмосферы на результат определения расстояния может внести в ошибку этого результата существенный вклад, исчисляемый сантиметрами. По этой причине определению метеопараметров уделяют отнюдь не меньшее внимание, чем работе с собственно дальномером.

Для того, чтобы оценить влияние ошибок определения метеопараметров на ошибку определения индекса преломления воздуха, представим формулы (1.7) и (1.8) в общем виде:

$$N = N(T, P, e). \quad (2.2)$$

Получим выражение для ошибки δ_N индекса преломления воздуха для электромагнитных волн в зависимости от ошибок δ_T , δ_P и δ_e в определении метеопараметров:

$$\delta_N = \left(\frac{dN}{dT}\right) \delta_T + \left(\frac{dN}{dP}\right) \delta_P + \left(\frac{dN}{de}\right) \delta_e \quad . \quad (2.3)$$

В этом выражении (dN/dT) , (dN/dP) и (dN/de) - частные производные от функции $N = N(T, P, e)$ по определяемым метеопараметрам T, P и e .

Численные значения этих частных производных можно вычислить, используя аналитические соотношения (1.7) и (1.8). Для определенности принимают, что измерения выполнены в метеорологических условиях, близких к стандартным. Именно для таких метеоусловий в учебнике [1] вычислены значения частных производных функции индекса преломления по метеопараметрам. Если наблюдения выполняют в диапазоне ультракоротких радиоволн, то выражение (2.3) принимает вид:

$$\delta_{N_{rad}} = -(1.4)\delta_T + (0.4)\delta_P + (5.9)\delta_e \quad . \quad (2.4)$$

Если же наблюдения выполняют в диапазоне световых волн, то, в смысле вычисления численных значений частных производных, возникает более сложная ситуация. Сложность заключается в том, что индекс преломления воздуха для световых волн зависит не только от метеорологических параметров. Значение этого индекса, как следует из формулы (1.8), зависит и от длины волны несущих световых колебаний. Поэтому значения частных производных необходимо вычислять для конкретного значения длины волны света.

В светодальномерах геодезического класса, то есть в высокоточных светодальномерах с дальностью действия в десятки километров, в качестве

источника несущих колебаний используют лазеры, излучающие свет красного цвета. Свет именно красного цвета испытывает малое поглощение в атмосфере в сравнении со светом другого цвета. Такими источниками света являются газовые гелий-неоновые лазеры (He-Ne лазеры). Длина волны излучения такого лазера равна 0,6 микрометра. Если подставить это значение в формулу (1.8), то получим, что значение индекса $N_{гр}^0$ преломления воздуха в стандартных метеорологических условиях равно 300,14.

Если длина волны несущих световых колебаний светодальномера именно такова, то есть равна 0,6 микрометра, то выражение (2.3) принимает вид:

$$\delta_{N_{гр}} = -(1.0)\delta_T + (0.4)\delta_P - (0.05)\delta_e. \quad (2.5)$$

В некоторых светодальномерах длина волны несущих колебаний лежит в инфракрасном диапазоне и равна примерно 0,9 микрометрам. Результаты вычислений показывают, что и при такой длине волны коэффициенты в формуле (2.5) не меняют существенным образом своих численных значений. Другими словами это означает, что формулу (2.5) можно использовать для того, чтобы оценить влияние ошибок определения метеорологических параметров на ошибку определения индекса преломления воздуха для несущих колебаний красного цвета и для несущих колебаний инфракрасного диапазона.

2.1. Влияние ошибок определения метеорологических параметров на ошибку измерения расстояния в диапазоне ультракоротких радиоволн

Подставив формулу (2.4) в формулу (2.1), получим следующее выражение для ошибки в расстоянии, вызванной ошибками в определении метеопараметров:

$$\delta_D = D[(1.4)\delta_T - (0.4)\delta_P - (5.9)\delta_e] \cdot 10^{-6}. \quad (2.6)$$

Вид этой формулы позволяет сделать следующие числовые оценки. Если в процессе измерения расстояния ошибка в определении температуры

воздуха составила один градус, то это внесет в результат измерения расстояния ошибку, равную примерно одной полуторамиллионной от длины измеряемого расстояния. Другими словами, если расстояние равно десяти километрам, то ошибка будет равна 14 миллиметрам. Если расстояние в несколько раз длиннее, то и соответствующая ошибка будет во столько же раз больше. Аналогично относительно давления. Если в процессе измерения расстояния ошибка в определении давления воздуха составила один миллиметр ртутного столба, то это внесет в результат измерения расстояния ошибку, равную примерно одной полумиллионной от длины измеряемого расстояния. Другими словами, если расстояние равно десяти километрам, то ошибка будет равна 4 миллиметрам. Если расстояние в несколько раз длиннее, то и соответствующая ошибка будет во столько же раз больше. И аналогично же относительно влажности. Если в процессе измерения расстояния ошибка в определении парциального давления водяных паров составила один миллиметр ртутного столба, то это внесет в результат измерения расстояния ошибку, равную примерно шести миллионным от длины измеряемого расстояния. Другими словами, если расстояние равно десяти километрам, то ошибка будет равна 59 миллиметрам. Если расстояние в несколько раз длиннее, то и соответствующая ошибка будет во столько же раз больше.

Приведенные числовые оценки точности позволяют сделать вывод о том, что на ошибку дальномерных измерений, выполняемых в диапазоне ультракоротких радиоволн, сильнее всего влияет ошибка в определении влажности воздуха.

2.2. Влияние ошибок определения метеопараметров на ошибку измерения расстояния в световом диапазоне

Подставив формулу (2.5) в формулу (2.1) получим следующее выражение для ошибки в расстоянии, вызванной ошибками в определении метеопараметров:

$$\delta_D = D[(1.0)\delta_T - (0.4)\delta_P + (0.05)\delta_e] \cdot 10^{-6}. \quad (2.7)$$

Вид этой формулы позволяет сделать следующие числовые оценки. Если в процессе измерения расстояния ошибка в определении температуры воздуха составила один градус, то это внесет в результат измерения расстояния ошибку, равную одной миллионной от длины измеряемого расстояния. Другими словами, если расстояние равно десяти километрам, то ошибка будет равна 10 миллиметрам. Если расстояние в несколько раз длиннее, то и соответствующая ошибка будет во столько же раз больше. Аналогично относительно давления. Если в процессе измерения расстояния ошибка в определении давления воздуха составила один миллиметр ртутного столба, то это внесет в результат измерения расстояния ошибку, равную примерно одной полумиллионной от длины измеряемого расстояния. Другими словами, если расстояние равно десяти километрам, то ошибка будет равна 4 миллиметрам. Если расстояние в несколько раз длиннее, то и соответствующая ошибка будет во столько же раз больше. Ситуация та же, что и при работе в ультракоротковолновом диапазоне.

Относительно измерения влажности возникает следующая ситуация. Если в процессе измерения расстояния ошибка в определении парциального давления водяных паров составила один миллиметр ртутного столба, то это внесет в результат измерения расстояния ошибку, равную пятидесяти миллиардным от длины измеряемого расстояния. Другими словами, если расстояние равно десяти километрам, то ошибка будет равна всего половине миллиметра. Если расстояние в несколько раз длиннее, то и соответствующая ошибка будет во столько же раз больше.

Приведенные числовые оценки точности позволяют сделать вывод о том, что на точность результата дальномерных измерений, выполняемых в световом диапазоне, сильнее всего влияет ошибка в определении температуры воздуха. Ошибка же в определении влажности воздуха оказывает на точность результата дальномерных измерений малое влияние.

3. Необходимая точность определения метеорологических параметров

Точность, с которой необходимо определять температуру, давление и влажность воздуха при измерении расстояния электронным дальномером, зависит от той точности, с которой это расстояние требуется измерить. Ошибка в расстоянии, вносимая ошибками определения метеопараметров, как видно из формул (2.1) – (2.3), прямо пропорциональна длине измеряемой линии. По этой причине в высшей геодезии, где измеряют расстояния длиной в десятки километров, точность измерений характеризуют относительной ошибкой. Например, в соответствии с инструкцией [7], базисные стороны сети триангуляции первого класса требовалось измерять с помощью светодальномеров с относительной ошибкой 1 : 400 000. Реально достигаемая в производственных (не особых, не экспериментальных, не уникальных) условиях точность светодальномерных измерений характеризуется относительной ошибкой порядка 1 : 1 000 000, то есть 10^{-6} . В условиях экспериментов были получены результаты с ошибками в десять и даже в сто раз меньшими. Однако в рамках данного учебного пособия для задания необходимых точностных характеристик определения метеопараметров мы будем придерживаться значения относительной ошибки 10^{-6} , характеризующей точность рядовых (массовых) производственных геодезических измерений.

Прежде всего необходимо сказать о том, почему вообще возникает вопрос о точности, то есть об ошибках определения метеопараметров. Разве

метеоприборы недостаточно точны? В предшествующих подразделах 2.1 и 2.2 мы упоминали об ошибке определения температуры воздуха в один градус. Откуда может возникнуть такая большая ошибка? Ведь в подразделе 1.4 написано, что цена деления термометра составляет две десятых градуса. Ошибка отсчитывания по шкале термометра не превышает этого значения. Ошибка определения шкаловой поправки, приведенной в таблице 1.1, лежит в пределах одной десятой градуса. Действительно, используя психрометр, можно измерить температуру воздуха вблизи приемопередатчика и вблизи отражателя с ошибкой порядка двух десятых градуса.

Проблема заключается в том, что недостаточно знать температуру воздуха только в этих двух точках измеряемой линии. Необходимо знать (определять) среднее (среднеинтегральное) значение температуры воздуха вдоль всей измеряемой линии. Строго говоря, необходимо и достаточно знать среднеинтегральное вдоль трассы распространения электромагнитной волны значение показателя (индекса) преломления воздуха [1-4]. В производственных условиях это требование выполнить невозможно. Хотя бы потому, что невозможно измерить температуру воздуха в середине измеряемой линии. С практической точки зрения эта проблема и пути решения этой проблемы рассмотрены в следующем разделе. Напомним еще раз, что проблемы с определением метеопараметров возникают именно в области высшей геодезии, то есть при создании опорной геодезической сети. Расстояния между пунктами такой сети составляют десятки километров и метеопараметры вдоль трассы существенным образом меняются и в пространстве и во времени.

Определение давления воздуха ставит перед полевым геодезистом, в сравнении с задачей определения температуры воздуха, несколько меньшие проблемы. Если посмотреть на коэффициент 0,4 при δ_r в формулах (2.4) и (2.5) и сравнить значение этого коэффициента со значениями 1,4 (формула 2.4) и 1,0 (формула 2.5) при δ_T , то можно заключить следующее. Ошибка в

определении давления воздуха в один миллиметр ртутного столба вносит в ошибку определения индекса преломления воздуха вклад, в 2-3 раза меньший, чем тот вклад, который вносит в ошибку определения индекса преломления воздуха ошибка в определении температуры воздуха в один градус. Ошибка в измерении давления воздуха гораздо меньше влияет на ошибку измерения расстояния, чем ошибка в измерении температуры воздуха. Кроме того, практика измерений показывает, что давление воздуха меняется вдоль измеряемой линии закономерным образом и в пространстве и во времени. Таким образом, определение среднеинтегрального вдоль линии значения давления воздуха принципиальных проблем полевому геодезисту не создает. Надо только практически следовать методике выполнения измерений метеопараметров, описанной в следующем разделе 4.

Если проанализировать формулу (2.5), то можно сделать следующий вывод. Учет влажности воздуха не создает проблем при измерении расстояния светодальномером. Действительно, малое значение 0,05 коэффициента, стоящего при ошибке δ_e в определении влажности воздуха, указывает на то, что ошибка δ_e вносит малый вклад в ошибку $\delta_{N_{гр}}$ определения индекса преломления воздуха для световых волн. Это обстоятельство учитывают и в методике измерения метеопараметров: чаще всего влажность воздуха определяют только на одном конце измеряемой линии - вблизи приемопередатчика.

Если же проанализировать формулу (2.4), то можно сделать следующий противоположный вывод. Учет влажности воздуха при измерении расстояния в радиодиапазоне создает как раз очень большие проблемы. Действительно, большое значение 5,9 коэффициента, стоящего при ошибке δ_e в определении влажности воздуха, указывает на то, что ошибка δ_e вносит большой вклад в ошибку $\delta_{N_{рад}}$ определения индекса преломления воздуха для радиоволн. Это обстоятельство является одной из

причин того, что дальномерные измерения, выполняемые в радиодиапазоне, дают результаты менее точные, чем измерения, выполняемые в световом диапазоне, то есть с использованием светодальномеров. Это же обстоятельство является одной из причин того, что в практике геодезических измерений в настоящее время радиодальномеры не используют. Однако это не означает, что проблема оценки влияния влажности воздуха на результаты линейных измерений снята. Эта проблема существует в спутниковых системах глобального позиционирования, поскольку измерения там выполняют именно в радиодиапазоне.

4. Методика определения метеорологических параметров

Принцип, заложенный в методику определения метеопараметров, состоит в том, чтобы выполнять отсчеты по метеорологическим приборам в нужных местах и в нужные моменты времени. Геометрия наблюдений иллюстрирована рисунком 4.1, аналогичным рисунку 1.1 из работы [5].

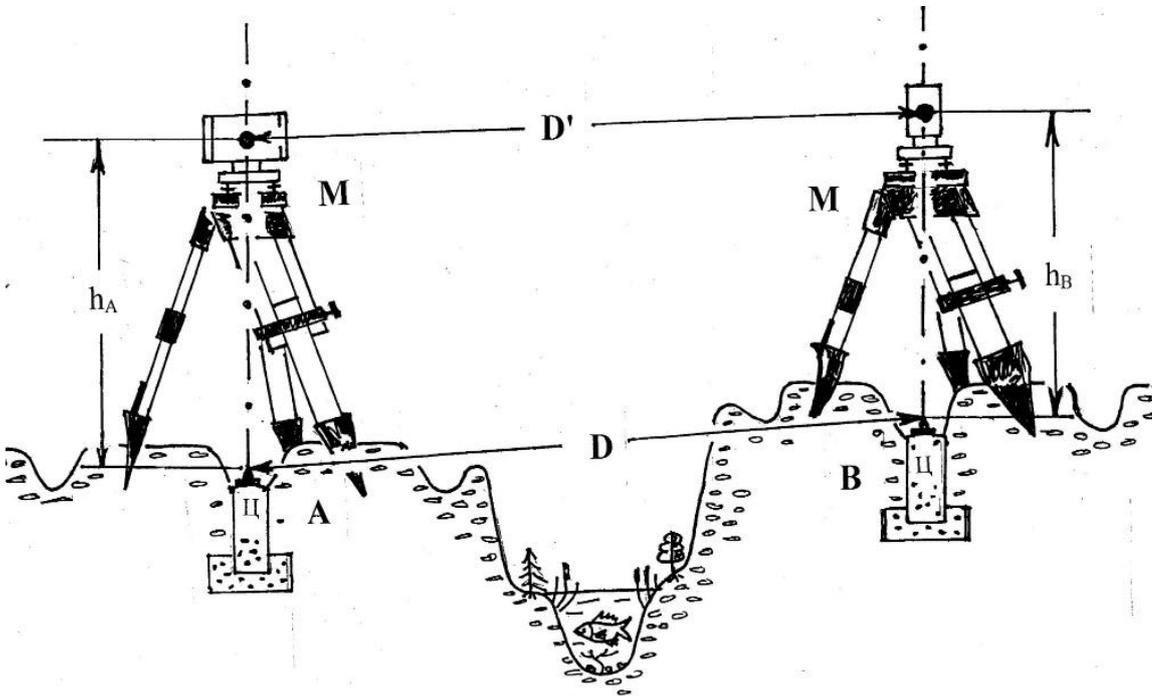


Рисунок 4.1. Геометрия наблюдений.

В левой части рисунка изображён установленный на пункте А приёмопередатчик, а в правой части рисунка изображён установленный на пункте В отражатель. На рисунке 4.2 для наглядности дана фотография приёмопередатчика светодальномера Geodolite 3G, [historywired.si.edu], способного измерять расстояния длиной до 100 километров с ошибкой в 1 миллиметр плюс 1 миллиметр на каждый километр.



Рисунок 4.2. Светодальномер Geodolite 3G.

Буква М, на рисунке 4.1 около приемопередатчика и около отражателя, обозначает комплект метеоприборов. Комплект метеоприборов располагают в тени и на расстоянии в 2-3 метра от приемопередатчика (отражателя) с тем, чтобы Солнце не нагревало метеоприборы и чтобы исполнитель и приёмопередатчик своим теплом не повлияли на показания термометров. Обычно барометр кладут на упаковочный ящик, а психрометр вешают на сук близрасположенного дерева или на спицы топографического зонта. В процессе выполнения отсчетов по метеоприборам брать их в руки нельзя, чтобы, опять же, не исказить показания термометров ни на одну десятую градуса. Итак, места расположения метеоприборов мы определили. Теперь следует описать, когда необходимо брать отсчеты по метеоприборам.

Показания метеоприборов необходимо отсчитывать в тот момент, когда наблюдатель выполняет отсчет расстояния по табло приемопередатчика светодальномера. Необходимость такой одновременности вызвана тем, что температура воздуха может быстро меняться. Чаще всего расстояние измеряют в темное время суток - после захода Солнца и перед его восходом. Напомним еще раз, что измеряемые в опорной геодезической сети расстояния между пунктами велики и составляют десятки километров. В светлое время суток измерить такие большие расстояния затруднительно - мешают посторонние засветки,

турбулентность воздуха. В результате мощность полезного светового сигнала, отраженного от отражателя и возвратившегося на приемопередатчик недостаточна. Либо вообще такого сигнала нет. В темное же время суток указанные факторы гораздо меньше влияют на возможность выполнения наблюдений.

После захода Солнца, то есть поздним вечером, температура воздуха довольно быстро падает. Перед восходом Солнца, то есть ранним утром, температура воздуха довольно быстро поднимается. Опыт показывает, что и дальномерные отсчеты, выполняемые после захода Солнца и перед его восходом, с течением времени наблюдений заметно меняются - "плывут". Это и объясняет необходимость брать отсчеты по метеоприборам одновременно с дальномерными отсчетами. Это требование "одновременности" нетрудно выполнить у приемопередатчика. Показания метеоприборов отсчитывает помощник наблюдателя, а он всегда знает, в какой момент времени наблюдатель выполняет дальномерный отсчет. Но возникает вопрос о том, как исполнитель (техник), работающий на отражателе, расположенном в десятках километров от приемопередатчика, узнает, в какие моменты времени наблюдатель выполняет дальномерные отсчеты? Наблюдатель и/или его помощник не могут сообщать технику, работающему на отражателе, о необходимом моменте взятия отсчета по метеоприборам. Работа на больших расстояниях вообще процедура тонкая, кропотливая, определяемая условиями видимости. В значительной мере успех зависит от квалификации и даже от искусства наблюдателя. Ни наблюдатель ни его помощник не могут отвлекаться ни на какие посторонние действия, в том числе не могут быть на постоянной связи с техником, работающим на отражателе. Тем более, что в темное время суток радиосвязь на больших расстояниях по не вполне понятным причинам бывает ненадежной - сильные радиопомехи или связи нет вообще. Выход из этой ситуации состоит в том, что моменты выполнения всех отсчетов и вообще

всех операций, выполняемых в ходе серии наблюдений, привязывают ко времени - процедуру наблюдений хронометрируют. Помощник наблюдателя записывает не только дальномерные отсчеты и отсчеты по метеоприборам. Он регистрирует моменты времени, когда эти отсчеты были взяты. Исполнитель, работающий на отражателе, отсчитывает показания метеоприборов через заранее указанный ему наблюдателем временной интервал, например, каждые пять минут: 22 часа 25 минут, 22 часа 30 минут и так далее. Показания метеоприборов и моменты выполнения этих отсчетов исполнитель на отражателе записывает. Начинает он эту процедуру и завершает ее по сигналам наблюдателя о начале серии наблюдений и о завершении этой серии. Если радиосвязь есть, то эти сигналы наблюдатель передает по рации. Если радиосвязи нет, то наблюдатель подает исполнителю на отражателе сигналы, мигая лазером. Когда в заранее оговоренное с наблюдателем по рации время начала серии наблюдений исполнитель на отражателе видит, что излучение направленного на него лазера мигает, он начинает отсчитывать показания метеоприборов, регистрируя эти отсчеты и моменты отсчитывания. Завершить эту процедуру исполнитель на отражателе может только тогда, когда он увидит, что направленный на него лазер опять начал мигать. Он не может прекратить работу, если увидел, что лазер просто потух. Возможно, серия наблюдений не завершена, а возникли технические проблемы и наблюдатель прервал серию наблюдений. Были случаи, когда наблюдатель, завершив успешную утреннюю серию наблюдений, на радостях забывал подать световой сигнал о завершении этой серии. Исполнитель на отражателе вынужден был продолжать свою работу до самого рассвета.

5. Выполнение лабораторной работы

В этом разделе описан порядок выполнения лабораторной работы; для удобства восприятия повторно приведены необходимые формулы. Лабораторную работу начинают с изучения метеорологических приборов: аспирационного психрометра Ассмана и барометра-анероида. Все необходимые сведения даны в подразделах 1.4 и 1.5. Психрометр подвешивают на кронштейне, барометр располагают на столе. Студенты изучают метеорологические приборы, их устройство, определяют цену делений шкал приборов, зарисовывают приборы в свои рабочие тетради.

5.1. Отсчитывание показаний метеоприборов

Отсчитывание показаний психрометра и барометра выполняют, как описано в подразделах 1.4 и 1.5, результаты отсчитывания записывают в рабочие тетради. Преподаватель проверяет и подписывает результаты.

В отсчеты по метеоприборам вводят поправки, как описано в тех же подразделах 1.4 и 1.5. Для этого используют паспорта, прилагаемые к психрометру и к барометру. Если паспорта отсутствуют, то разрешается в учебных (не в производственных) целях использовать для этой цели образцы паспортов, приведенные в таблицах 1.1 и 1.3.

Используя формулу (1.11) с приведенными ниже этой формулы пояснениями, а также используя таблицу 1.2, либо аналогичную психрометрическую таблицу, вычисляют парциальное давление e водяных паров.

$$e = E - \frac{P}{k}(t_c - t_v) \quad . \quad (1.11)$$

5.2. Вычисление индекса преломления воздуха и рабочей скорости для ультракоротких радиоволн и для световых волн

По формуле (1.7) вычисляют значение индекса преломления воздуха для ультракоротких радиоволн.

$$N_{\text{рад}} = a \frac{P}{T} + b \frac{e}{T} + c \frac{e}{T^2} . \quad (1.7)$$

По формуле (1.4) вычисляют значение показателя преломления воздуха для ультракоротких радиоволн.

$$n = 1 + (N) \cdot 10^{-6} . \quad (1.4)$$

По формуле (1.2) вычисляют значение рабочей скорости распространения ультракоротких радиоволн в метеорологических условиях, соответствующих измеренным значениям метеопараметров.

$$V = \frac{c}{n} . \quad (1.2)$$

Процедура оценки влияния метеоусловий на рабочую скорость распространения световых волн в значительной мере аналогична описанной в предшествующем абзаце процедуре оценки влияния метеоусловий на рабочую скорость распространения ультракоротких радиоволн. Но она более сложна, поскольку, до того, как применять формулу (1.10), её необходимо привести к рабочему виду.

$$N_{\text{гр}} = N_{\text{гр}}^0 \frac{T_0}{P_0} \cdot \frac{P}{T} - \left(17.045 - \frac{0.56}{\lambda^2} \right) \cdot \frac{e}{T} . \quad (1.10)$$

Для того, чтобы получить рабочую формулу, необходимо прежде всего, используя формулу (1.8) и значения дисперсионных коэффициентов (1.9), вычислить значение индекса преломления воздуха для световых волн в стандартных метеоусловиях для той длины волны света, который излучает источник света данного конкретного светодальномера.

$$N_{\text{гр}}^0 = A_0 + \frac{3B_0}{\lambda^2} + \frac{5C_0}{\lambda^4} . \quad (1.8)$$

$$A_0 = 287,583; B_0 = 1,6134; C_0 = 0,01367. \quad (1.9)$$

Например, если в качестве такого источника света использован гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения 0,6328 микрометра, то значение индекса преломления воздуха для световых волн в стандартных

метеоусловиях равно 300,14. Для другой длины волны света, лежащей, например, в инфракрасном (невидимом для человеческого глаза) диапазоне, значение индекса преломления воздуха для световых волн в стандартных метеоусловиях будет несколько иным, но имеющим тот же порядок величины. Полученную таким образом величину умножают на значение стандартной температуры воздуха $T_0 = 288^{\circ},15 \text{ К}$ ($t_0 = 15^{\circ},0 \text{ С}$) и делят на значение стандартного давления воздуха $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$, смотри формулу (1.10). Тем самым первый член формулы (1.10) примет вид некоторого числового коэффициента, умноженного на дробь P/T . Подставив значение длины волны света в стоящее в круглых скобках выражение, получают численное значение коэффициента, умноженного на дробь e/T . Результатом этих вычислений и является рабочая формула индекса преломления воздуха для световых колебаний в метеоусловиях, соответствующих, характеризующихся данными метеопараметрами.

Далее выполняют ту же последовательность вычислений, что и для ультракоротких радиоволн, а именно. По формуле (1.7) вычисляют значение индекса преломления воздуха для ультракоротких радиоволн. По полученной рабочей формуле вычисляют значение показателя преломления воздуха для световых волн. По формуле (1.2) вычисляют значение рабочей скорости распространения световых волн в метеорологических условиях, соответствующих измеренным значениям метеопараметров.

5.3. Вычисление метеопоправки в результаты светодальномерных измерений

Вычисленное значение рабочей скорости распространения световых волн в метеорологических условиях, соответствующих измеренным значениям метеопараметров, можно использовать для вычисления измеренного светодальномером расстояния. Для этого значение рабочей скорости подставляют в основную формулу фазовой дальнометрии [1], в

основе которой лежит основная формула дальнометрии (1.1). При обработке результатов производственных измерений поступают иным образом: полученные по дальномеру отсчеты исправляют поправкой, которую называют метеопоправкой, поправкой за влияние атмосферы или поправкой за рабочую скорость распространения электромагнитной волны. Исправленное таким образом расстояние вычисляют по формуле:

$$D = D_0 + k_{\text{метео}}, \quad (5.1)$$

где D_0 - результат измерения расстояния, то есть, отсчет по табло светодальномера;

$k_{\text{метео}}$ - метеопоправка за отклонение реальных метеоусловий от стандартных.

Метеопоправку вычисляют по формуле:

$$k_{\text{метео}} = (N_{\text{гр}} - N_{\text{гр}}^0) D_0. \quad (5.2)$$

Здесь величины в круглых скобках те же, что и в формулах (1.8) и (1.10), а размерность подобрана так, что D_0 выражено в километрах, а $k_{\text{метео}}$ получается выраженным сразу в миллиметрах. Окончательный результат получают, выразив значение метеопоправки в метрах. Для вычисления метеопоправки каждый студент использует свое значение расстояния. Например, D_0 может быть вычислено по формуле:

$$D_0 = 20 \text{ км} + i, \quad (5.3)$$

где i - порядковый номер студента по списку в журнале.

5.4. Отчётность по работе

1. Краткое описание метеоприборов с их зарисовкой.
2. Отсчёты по метеоприборам, подписанные преподавателем и исправленные аппаратурными поправками.
3. Рабочая формула индекса преломления для световых волн.
4. Результаты вычисления рабочей скорости световых волн и радиоволн для измеренных значений метеопараметров.

5. Значение метеопоправки в результаты светодальномерных измерений.

Заключение

Содержание данного учебного пособия помогает студентам освоить практические аспекты метеорологических наблюдений, входящих в комплекс геодезических измерений. При составлении этого пособия авторы использовали принятые международным геодезическим сообществом стандартные процедуры, работы авторитетных геодезистов, а также собственный опыт полевых наблюдений.

Литература

1. Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радиогодезические и электрооптические измерения. Москва. Недра, 1985, 303 с.
2. Голубев А.Н. Основы геотроники. Электронные методы и средства геодезических измерений. Москва. МИИГАиК, 2003, 87 с.
3. Лобачев В.М. Радиоэлектронная геодезия. Москва. Недра, 1980, 327 с.
4. Шануров Г.А., Мельников С.Р. Геотроника. Учебное пособие. Москва. МИИГАиК, 2001, 136 с.
5. Шануров Г.А. Высшая геодезия. Часть 2. Технология создания опорной геодезической сети. Измерение расстояния электронным дальномером геодезического класса. Москва. МИИГАиК, 2005, 36 с.
6. Шануров Г.А., Чеховский А.М. Исследования фазовых геодезических дальномеров. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу “Радиогодезические и электрооптические измерения”. Москва. МИИГАиК, 1989, 35 с.
7. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. Москва. Недра, 1966.
8. Шануров Г.А., Голубев А.Н. Геотроника часть 3. Определение рабочей скорости распространения электромагнитных волн при измерении расстояния электронным дальномером геодезического класса. Текст лекций и методические указания. Москва. 2012. Сайт МИИГАиК, кафедра высшей геодезии. <http://miigaik.ru/publication/>