

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

Г. А. Шароглазова

ВЫСШАЯ ГЕОДЕЗИЯ

ОСНОВНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-56 02 01 «Геодезия»
и слушателей ИПК специальности 1-56 02 71
«Прикладная геодезия и геодезическое обеспечение кадастра»

2-е издание

Новополоцк
ПГУ
2010

УДК 528(075.8)
ББК 26.11я73
Ш25

Рекомендовано к изданию методической комиссией
геодезического факультета
в качестве учебно-методического комплекса
(протокол № 33 от 19.12.2007)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

канд. техн. наук, начальник отдела техн. проектирования
и экспертизы работ УП «Белаэрокосмогеодезия»

Б. А. ФУРМАН;

д-р техн. наук, проф., зав. каф. прикладной геодезии
и фотограмметрии УО «Полоцкий государственный университет»

В. П. ПОДШИВАЛОВ

Шароглазова, Г. А.

Ш25 Высшая геодезия : Основные геодезические работы : учеб.-метод. комплекс /
Г. А. Шароглазова. – 2-е изд. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 148 с.
ISBN 978-985-531-159-2.

Материал изложен с учетом стандарта специальности и учебного плана.
Приведены темы изучаемого курса, их объем в часах лекционных и лаборатор-
ных занятий, опорный конспект лекций, методические указания к лаборатор-
ным работам, список рекомендуемой литературы.

Первое издание вышло в 2008 г.

Предназначен для студентов, магистрантов, аспирантов геодезических спе-
циальностей, преподавателей высших и средних учебных заведений, слушате-
лей ИПК, инженерно-технических работников.

УДК 528(075.8)
ББК 26.11я73

ISBN 978-985-531-159-2

© Шароглазова Г. А., 2008
© УО «Полоцкий государственный университет», 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Рабочая программа	6
ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС	
Лекция 1. Предмет и задачи высшей геодезии.	
Основные понятия и определения	9
1.1. Введение в высшую геодезию. Связь высшей геодезии с основами геодезии. Задачи высшей геодезии	9
1.2. Понятие о геоиде, квазигеоиде, земном эллипсоиде	13
1.3. Основные разделы высшей геодезии; связь дисциплины с другими науками	16
Лекция 2. Системы координат, применяемые в высшей геодезии.	
Геодезические сети	17
2.1. Основные системы координат, применяемые в высшей геодезии. Понятие о геодезических и астрономических координатах и азимутах	17
Лекция 3. Общие сведения о геодезических сетях	23
3.1. Классификация геодезических сетей	23
3.2. Назначение геодезических сетей	25
3.3. О плотности и точности построения ГГС	26
Лекция 4. Методы, программы создания и модернизация геодезических сетей	29
4.1. Методы построения плановых геодезических сетей	29
4.2. Схемы и программы построения существующих опорных геодезических сетей	32
4.3. Совершенствование ГГС СССР и Беларуси	35
Лекция 5. Последовательность выполнения работ по созданию плановой ГГС. Закрепление пунктов на местности. Геодезические центры. Угломерные инструменты	39
5.1. Последовательность выполнения работ по созданию плановой ГГС	39
5.2. Закрепление пунктов на местности	39
5.3. Высокоточные теодолиты	42
5.4. Теория отсчитывания по кругу оптического теодолита	45
5.5. Контрольные испытания оптических теодолитов	47
Лекция 6. Ошибки высокоточных угловых измерений и меры ослабления их влияния	49
6.1. Классификация ошибок угловых измерений	49
6.2. Влияние основных инструментальных погрешностей теодолита на результаты угловых измерений	50
Лекция 7. Высокоточные угловые измерения (начало)	56
7.1. Общие сведения о производстве высокоточных угловых измерений	56
7.2. Измерение горизонтальных направлений способом круговых приемов	57
7.3. Математическая обработка результатов угловых измерений на пункте в способе круговых приемов	59
Лекция 8. Высокоточные угловые измерения (продолжение)	63
8.1. Измерение горизонтальных углов способом всевозможных комбинаций	63
8.2. Уравнивание на станции результатов измерений в способе всевозможных комбинаций	67
8.3. Сравнение трудоемкостей двух классических способов	71

Лекция 9. Высокоточные угловые измерения (окончание)	72
9.1. Способ неполных приемов Аладжалова	72
9.2. Способ Томилина или видоизмененный способ всевозможных комбинаций	74
9.3. Меры по ослаблению влияния внешних условий на результаты измерений горизонтальных углов и направлений	75
Лекция 10. Элементы приведения.	
Последовательность работ на пункте триангуляции	80
10.1. Понятие элементов приведения.	
Вычисление поправок за элементы приведения	80
10.2. Графический способ определения элементов приведения	82
10.3. Последовательность работ на пункте триангуляции	83
10.4. Предварительные вычисления при обработке линейно-угловых плановых сетей	84
Лекция 11. Высокоточное геометрическое нивелирование:	
Общие сведения. Классификация и назначение нивелирных сетей.	
Понятие о системах высот, применяемых в геодезии. Нивелирные знаки	88
11.1. Общие сведения о нивелирных сетях. Классификация и назначение нивелирных сетей. Государственная нивелирная сеть	88
11.2. Понятие о системах высот, применяемых в геодезии	90
11.3. Классификация нивелирных знаков	94
Лекция 12. Приборы для нивелирования I и II классов.	
Поверки и исследования	96
12.1. Общие сведения о высокоточных нивелирах	96
12.2. Нивелирные рейки, используемые при высокоточном нивелировании	100
12.3. Поверки и исследования высокоточных нивелиров и реек	101
Лекция 13. Источники ошибок при высокоточном нивелировании и методы ослабления их влияния. Методика высокоточного нивелирования	107
13.1. Источники ошибок при высокоточном нивелировании и методы ослабления их влияния	107
13.2. Методика высокоточного нивелирования	111
Лекция 14. Полевые контроли при высокоточном нивелировании.	
Предварительная обработка	113
14.1. Полевые контроли при высокоточном нивелировании	113
14.2. Предварительная обработка результатов высокоточного нивелирования. Оценка точности	113
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	
Лабораторная работа № 1. Определение погрешности совмещения штрихов шкал оптического микрометра	117
Лабораторная работа № 2. Наблюдение горизонтальных направлений по способу круговых приемов	119
Лабораторная работа № 3. Математическая обработка результатов наблюдений в способе круговых приемов	127
Лабораторная работа № 4. Наблюдение горизонтальных углов по способу всевозможных комбинаций	131
Лабораторная работа № 5. Математическая обработка результатов наблюдений в способе всевозможных комбинаций	140
Лабораторная работа № 6. Определение цены деления цилиндрического уровня по рейке	143
Литература	147

ВВЕДЕНИЕ

Геодезия – очень распространенная область знаний, с которой человек постоянно сталкивается в практической деятельности, используя топографические карты, занимаясь строительством дорог, зданий, промышленных комплексов, запуская космические корабли и т.д. В целом ее можно разделить на «собственно геодезию», рассматривающую вопросы геодезического обеспечения в повседневной практике, и высшую геодезию, которая делает возможным простое применение геодезии в практической жизни.

Студенты первых двух курсов получают, в основном, знания по «собственно геодезии», включающие такие геодезические понятия как ориентирование, азимут, рельеф, системы координат, применяемые в практике повседневных геодезических работ, дирекционный угол, способы получения плановых и высотных координат; виды геодезических измерений; топографическая съемка, методы создания планово-высотного обоснования для этой съемки и т.д. При этом, выполняя геодезическую работу, например, топографическую съемку, они пользуются уже готовой исходной основой, т.е. прямоугольными координатами углов рамок трапеций, координатной сеткой, плановыми и высотными координатами исходных пунктов государственной геодезической сети, которая при необходимости сгущается планово-высотными съемочными сетями. Топографическая съемка сводится к очень простому процессу: определение расстояния и превышения точки местности относительно точки стояния прибора. Простота производства топографической съемки обусловлена, прежде всего, наличием готовой координатной исходной основы необходимой точности и плотности, при которой отпадает необходимость учета в результатах геодезических измерений кривизны Земли и неоднородностей гравитационного поля Земли в пределах участка съемки. Но возможность такого простого подхода при топографической съемке, под которой в данном случае мы понимаем картографирование территории страны в единой системе координат, обеспечена сложным подготовительным процессом создания опорной геодезической сети, изучения гравитационного поля Земли, а также решения ряда других проблем, которыми уже занимается высшая геодезия.

Высшая геодезия – это обширная область знаний, занимающаяся определением формы, размеров и гравитационного поля Земли, заданием систем координат, созданием государственных опорных геодезических сетей, обеспечивающих по точности и плотности картографирование страны и выполнение инженерно-геодезических работ, изучением геодинامي-

ских явлений, решением геодезических задач на поверхности земного эллипсоида и в пространстве.

Настоящий раздел высшей геодезии рассматривает основные геодезические работы, которые выполняются при создании государственных геодезических сетей, плановых и высотных. Акцент сделан на наземные высокоточные геодезические измерения и, соответственно, на геодезические сети высших классов.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Целью преподавания раздела «Основные геодезические работы» **дисциплины** «Высшая геодезия» является получение теоретических и практических знаний по вопросам создания государственных геодезических сетей и используемым при создании этих сетей методам высокоточных геодезических измерений.

Задачи дисциплины предполагают теоретическое и практическое освоение четырех основных тем:

- Введение в высшую геодезию.
- Опорные геодезические сети.
- Высокоточные угловые измерения.
- Высокоточное геометрическое нивелирование

2. Виды занятий и формы контроля знаний

Виды занятий, формы контроля знаний	Количество часов
Курс	3
Семестр	5
Экзамен (семестр)	5
Зачет (семестр)	
Лекции, ч	28
Практические (семинарские), ч	
Лабораторные занятия, ч	28
Расчетно-графические работы (семестр)	
Контрольные работы (семестр)	
Самостоятельная работа, ч	18

3. Содержание дисциплины

3.1. Наименование тем, их содержание, объем в часах лекционных занятий

№	Наименование раздела, темы	Содержание	Объем в часах
Основные геодезические работы			
1	Введение в высшую геодезию	Введение. Связь высшей геодезии с основами геодезии. Задачи высшей геодезии. Понятие о геоиде, квазигеоиде, общем земном эллипсоиде. Разделы высшей геодезии; связь дисциплины с другими науками. Системы координат, применяемые в высшей геодезии. Геодезические, астрономические координаты и азимуты	4
2	Государственные геодезические сети	Общие положения. Схемы, программы и методы создания плановых государственных геодезических сетей. Необходимая плотность пунктов и точность построения государственной геодезической сети. Последовательность выполнения работ по созданию плановой ГГС. Закрепление пунктов на местности. Модернизация плановой государственной геодезической сети	5
3	Производство угловых измерений в плановых государственных геодезических сетях	Приборы и способы производства высокоточных угловых измерений. Источники ошибок при высокоточных угловых измерениях и методики ослабления их влияния. Предварительная обработка результатов угловых измерений	12
4	Высокоточное геометрическое нивелирование	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Классификация и назначение нивелирных сетей. ▪ Схема построения современной государственной нивелирной сети. ▪ Понятие о системах высот, применяемых в геодезии. ▪ Классификация нивелирных знаков. ▪ Высокоточные нивелиры, рейки и их поверки и исследования. ▪ Источники ошибок при высокоточном нивелировании и методы ослабления их влияния. ▪ Методика высокоточного нивелирования. Контроли на станции и по секции. ▪ Предварительная обработка результатов высокоточного нивелирования. ▪ Оценка точности результатов высокоточного нивелирования 	7
Всего			28

3.2. Наименование тем, их содержание, объем в часах лабораторных занятий

№	Наименование раздела, тем лабораторных занятий и их содержание	Содержание	Объем в часах
Основные геодезические работы			
3	Исследование высокоточных теодолитов	Знакомство с высокоточными теодолитами. Исследование ошибок совмещения штрихов оптического микрометра	3
3	Наблюдение по способу круговых приемов (СКП)	Составление программы наблюдений для 4-х направлений с весом $P = 24$. Выполнение наблюдений	6
		Математическая обработка в СКП	2
3	Наблюдение по способу всевозможных комбинаций (СВК)	Составление программы наблюдений для 4-х направлений с весом $P = 24$. Выполнение наблюдений	7
		Математическая обработка в СВК	2
4	Высокоточное нивелирование	Знакомство с высокоточным нивелиром Н05. Определение цены деления цилиндрического уровня по рейке	5
		Выполнение программы наблюдений по методике нивелирования II класса	3
Всего			28

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Лекция 1 ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ВЫСШЕЙ ГЕОДЕЗИИ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Введение в высшую геодезию.

Связь высшей геодезии с основами геодезии. Задачи высшей геодезии

Приступая к изучению высшей геодезии, неотъемлемой и важнейшей составляющей всего комплекса дисциплин по геодезической специальности, попробуем перекинуть мостик от геодезических знаний, полученных вами на двух первых курсах. С этой целью сформулируем содержание геодезии в общем виде.

Геодезия – это наука об определении формы и размеров Земли, а также о выполнении измерений на земной поверхности с целью отображения этой поверхности на планах и картах. Она подразделяется на *высшую геодезию*, изучающую фигуру и гравитационное поле Земли, а также теорию и методы построения опорных геодезических сетей, и *собственно геодезию*, разрабатывающую способы измерений, применяемые в топографии и инженерном деле. После построения опорной геодезической сети пункты этой сети получают плановые и высотные координаты, которые являются исходными для различных видов геодезических работ, проводимых во многих отраслях народного хозяйства.

Таким образом, на младших курсах вы получили, в основном, знания по «собственно геодезии», которые включили такие простейшие геодезические понятия как ориентирование, азимут, рельеф, а также более сложные специальные понятия: системы координат, применяемые в практике повседневных геодезических работ; дирекционный угол; способы получения плановых и высотных координат; виды геодезических измерений; топографическая съемка; методы создания планово-высотного обоснования для этой съемки и т.д. При этом, выполняя геодезическую работу, например, топографическую съемку, вы пользовались уже готовой исходной основой, т.е. прямоугольными координатами углов рамок трапеций, координатной сеткой, плановыми и высотными координатами исходных пунктов государственной геодезической сети, которую вы при необходимости сгущали планово-высотными съемочными сетями. В дальнейшем при съемке вы отождествляли плоский планшет со снимаемым участком земной поверхности. И задача воспроизводства местности на планшете сводилась к

перенесению в масштабе съемки точек земной поверхности на сориентированный в заданной системе координат планшет и в определении высот этих точек по измеренным превышениям относительно отметки точки стояния, т.е. к очень простому процессу. Простота производства топографической съемки обусловлена, прежде всего, наличием готовой координатной исходной основы необходимой точности и плотности, при которой отпадает необходимость учета в результатах геодезических измерений кривизны Земли и неоднородностей гравитационного поля Земли в пределах участка съемки. Но возможность такого простого подхода при топографической съемке, под которой в данном случае мы понимаем картографирование территории страны в единой системе координат, обеспечена сложным подготовительным процессом создания опорной геодезической сети, изучения гравитационного поля Земли, а также решения ряда других проблем, которыми занимается уже высшая геодезия.

Поясним это. Проблема использования результатов геодезических измерений не так проста, как вам могло показаться после изучения геодезии на двух первых курсах. Дело в том, что геодезические измерения выполняются на геометрически и математически сложной физической поверхности Земли и в реальном гравитационном поле, что на чертеже можно показать так (рис. 1.1):

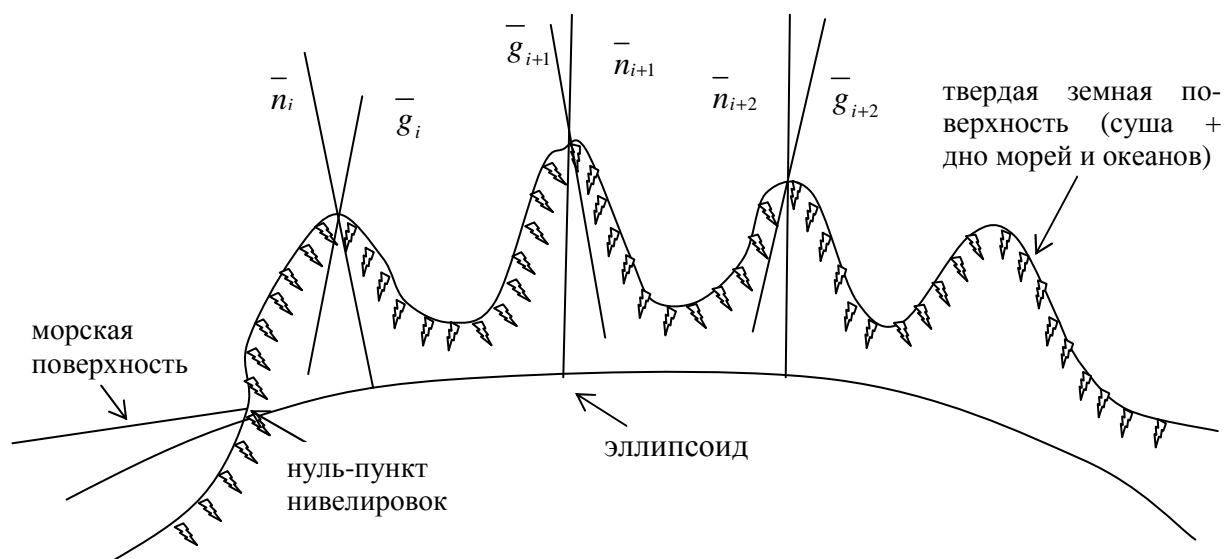


Рис. 1.1. Иллюстрация к использованию результатов геодезических измерений, выполненных на реальной земной поверхности:

\overline{g}_i – направления отвесных линий, совпадающие с направлением вертикальных осей геодезических приборов в момент измерений; \overline{n}_i – направления нормалей к эллипсоиду в точках стояния геодезических инструментов

При выполнении измерений вертикальные оси геодезических инструментов в пункте наблюдения устанавливаются по направлениям отвесных линий. Направления отвесных линий являются характеристиками гравитационного поля Земли, состояние которого зависит от ее формы и от распределения масс внутри Земли. По этой причине гравитационное поле Земли не является однородным, и отвесные линии на земной поверхности не параллельны между собой. Поэтому первичные результаты геодезических измерений представляют собой некоторый хаотичный набор данных, относящихся к математически сложной поверхности и неудобных для практического использования. Чтобы результаты геодезических измерений можно было использовать при решении практических задач, они должны быть систематизированы и в конечном итоге представлены в виде каких-то координат, удобнее всего, прямоугольных. Так как геодезические сети, как правило, представляют собой систему треугольников, то задача по определению координат пунктов, расположенных в вершинах треугольников, является геометрической. Для возможности применения при математической обработке известных формул аналитической геометрии результаты геодезических измерений (расстояния между пунктами, горизонтальные направления, азимуты земных предметов и т.д.), полученные на математически и геометрически сложной поверхности реальной Земли, должны быть перенесены или редуцированы на сравнительно простую в геометрическом отношении вспомогательную поверхность, позволяющую использование этих формул. Поверхность должна быть достаточно близка к поверхности реальной Земли. Поэтому она определенным образом подбирается и ориентируется в теле Земли. Указанную вспомогательную поверхность принято называть *поверхностью относимости*, и она имеет вид *эллипсоида вращения*.

Задачей редуцирования результатов геодезических измерений на поверхность относимости занимается уже высшая геодезия. Это довольно сложная задача, и ее решение требует не только математических знаний, но и знаний о реальном гравитационном поле Земли, так как при редуцировании отвесные линии заменяются нормальными к поверхности относимости. Поэтому на первом этапе редуцирования необходимо исправить результаты геодезических измерений поправками за отклонения отвесных линий от нормали, что возможно только при изученности гравитационного поля Земли.

Кроме того, поверхность относимости должна быть достаточно близкой к поверхности Земли. Поэтому для ее подбора мы должны достаточно хорошо знать фигуру и размеры Земли. Таким образом, возникает круг взаимосвязанных проблем, которые и решает высшая геодезия. Дадим

полное определение этой дисциплины, включая и вопросы создания опорных геодезических сетей, а также логически связанных с высшей геодезией научных исследований.

Высшая геодезия – это наука, занимающаяся определением формы, размеров и гравитационного поля Земли, созданием государственных опорных геодезических сетей, изучением геодинамических явлений, решением геодезических задач на поверхности земного эллипсоида и в пространстве.

Задачи высшей геодезии

Круг задач, решаемых высшей геодезией, принято подразделять на *научные и научно-технические*.

Главной научной задачей высшей геодезии является изучение фигуры (формы и размеров) и гравитационного поля Земли по данным геодезических, гравиметрических измерений, астрономических определений и наблюдений искусственных спутников Земли.

Решение этой задачи включает в себя два основных пункта:

- определение вида и размеров математически простой поверхности (поверхности относимости), достаточно хорошо представляющей фигуру Земли в целом;
- изучение действительной фигуры Земли, т.е. реальной физической земной поверхности, и ее внешнего гравитационного поля.

В качестве поверхности относимости принимают поверхность эллипсоида вращения с малым полярным сжатием, который называется *земным эллипсоидом*. Определение поверхности земного эллипсоида заключается в установлении параметров, характеризующих его размеры, форму и расположение (ориентирование) в теле Земли.

Изучение действительной фигуры Земли заключается в определении геометрических величин, характеризующих отступления ее поверхности от поверхности установленного земного эллипсоида.

Внешнее гравитационное поле Земли изучают по такому же принципу, что и фигуру Земли: сначала определяют гравитационное поле земного эллипсоида (нормальной Земли), а затем определяют отступление гравитационного поля реальной Земли от гравитационного поля выбранного эллипсоида.

К числу других *научных задач высшей геодезии* относятся, прежде всего, геодинамические исследования, т.е. изучение современных движений земной коры (СДЗК), движений земных полюсов, определение разностей уровней и перемещений береговых линий морей и океанов.

Научно-технические задачи высшей геодезии заключаются:

1) в создании опорных сетей: геодезической, обеспечивающей плановые и высотные координаты, и гравиметрической, дающей абсолютные значения ускорения силы тяжести;

2) в разработке и совершенствовании методов высокоточных измерений (линейных, угловых, нивелирования, астрономических определений, наблюдений ИСЗ, гравиметрических);

3) в разработке методов математической обработки результатов указанных в пункте 2 измерений и в выполнении этой обработки.

Заметим, что методами высшей геодезии определяются координаты отдельных, дискретных точек земной поверхности, т.е. пунктов государственных опорных сетей. В дальнейшем координаты этих пунктов используются как исходные для детального изучения между ними формы физической поверхности Земли методами топографии. Топография, используя опорную геодезическую сеть, уже не требует применения теории высшей геодезии.

Кроме того, важно отметить, что методы и приборы, разрабатываемые в высшей геодезии, находят все возрастающее применение в практике строительства различных инженерных сооружений – научных, промышленных, гидро- и теплоэнергетических, транспортных и т.д.

1.2. Понятие о геоиде, квазигеоиде, земном эллипсоиде

Геоид, квазигеоид и общий земной эллипсоид – это три модели Земли. Дадим их определения с точки зрения современных представлений о фигуре Земли.

Под *фигурой Земли* в настоящее время понимают фигуру, ограниченную физической поверхностью Земли, т.е. поверхностью ее твердой оболочки на суше и невозмущенной поверхностью морей и океанов.

Суша составляет третью часть от земной поверхности и в среднем она возвышается над водой примерно на 900 м, что незначительно по сравнению с радиусом Земли (6 371 км). Поэтому за фигуру Земли в первом приближении принят геоид.

Дадим два определения геоида:

1. Строгое: *геоид – это уровенная поверхность поля силы тяжести Земли, проходящая через начало счета высот.*

2. Нестрогое: *геоид – это фигура, ограниченная невозмущенной поверхностью морей и океанов и продолженная под материками так, чтобы отвесные линии во всех ее точках были перпендикулярны к ней.*

Более ста лет, т.е. с первой половины прошлого века геодезисты и геофизики изучали фигуру геоида и считали это основной научной задачей высшей геодезии. В середине прошлого столетия советским ученым М.С. Молоденским было доказано, что фигура геоида, строго говоря, неопределима. Он предложил основной задачей высшей геодезии считать изучение фигуры реальной Земли и ее гравитационного поля. М.С. Молоденский создал теорию, которая позволяет дать точное определение фигуры Земли на основании выполненных на земной поверхности измерений без привлечения каких-либо гипотез об ее внутреннем строении.

В теории М.С. Молоденского в качестве вспомогательной вводится поверхность *квазигеоида, совпадающая с геоидом на океанах и морях и весьма мало отступающая от поверхности геоида на суше (менее 2 м)*.

В отличие от геоида поверхность квазигеоида может быть строго определена по результатам наземных наблюдений.

С понятием *земного эллипсоида* мы уже столкнулись при рассмотрении главной научной задачи высшей геодезии. Напомню, что поверхность земного эллипсоида является той математически и геометрически простой поверхностью, на которой могут быть решены геодезические задачи по координированию точек

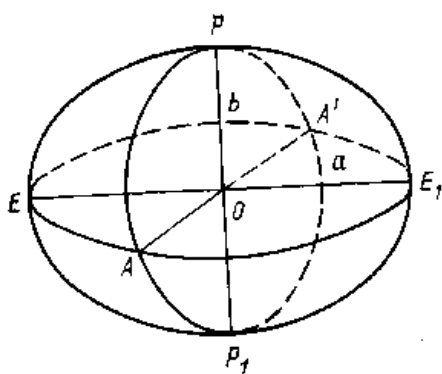


Рис. 1.2. К понятию земного эллипсоида: a – большая полуось; b – малая полуось

и которая достаточно близка к поверхности Земли. Земной эллипсоид представляет собой эллипсоид вращения с малым полярным сжатием. Его поверхность может быть получена вращением полуэллипса PEP_1 вокруг его малой оси PP_1 (рис 1.2).

Поверхность земного эллипсоида в геодезии принимают за отсчетную, определяя относительно нее высоты точек поверхности изучаемой фигуры Земли.

Форма и размеры земного эллипсоида характеризуются большой и малой полуосями a и b , а чаще большой полуосью a и полярным сжатием α

$$\alpha = \frac{a-b}{a} \quad (1.1)$$

или большой полуосью a и эксцентриситетом e меридианного эллипса

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}. \quad (1.2)$$

Эллипсоид, имеющий наибольшую близость к фигуре Земли в целом, называется *общим земным эллипсоидом*.

Параметры общего земного эллипсоида определяются под условиями:

- 1) центр эллипсоида должен совпадать с центром масс Земли, а его малая ось с осью вращения Земли*;
- 2) объем эллипсоида должен быть равен объему геоида (квазигеоида);
- 3) сумма квадратов отклонений по высоте поверхности эллипсоида от поверхности геоида (квазигеоида) должна быть минимальной.

Параметры земного эллипсоида могут быть получены с помощью так называемых *градусных измерений*, заключающихся в проложении рядов триангуляции по направлениям меридианов и параллелей на разных широтах с определением на конечных пунктах астрономических широт, долгот и азимутов сторон, а также по результатам спутниковых наблюдений.

В течение полутора веков ученые разных стран занимались определением параметров земного эллипсоида, используя доступные им результаты градусных измерений. Итогом этих определений служит появление ряда эллипсоидов, наиболее известные из которых представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Параметры наиболее известных земных эллипсоидов

Ученый	Государство	Год	a , м	α
Деламбр	Франция	1800	6 375 653	1/334.0
Бессель	Германия	1841	6 377 397	1/299.2
Кларк	Великобритания	1866	6 378 206	1/294.98
Хейфорд	США	1910	6 378 388	1/297
Красовский	СССР	1940	6 378 245	1/298.3
Эллипсоиды, полученные по результатам спутниковых наблюдений		1980	6 378 137	1/298.257
		1984 (WGS84)	6 378 137	1/298.257220

В каждой стране принимают в качестве рабочего тот эллипсоид, который наилучшим образом подходит для ее территории. В соответствии с этим критерием выполняют и его ориентирование в теле Земли, т.е. определение координат начального пункта. Такие рабочие эллипсоиды, используемые в разных странах, называются *референц-эллипсоидами*. В СССР и ряде стран восточной Европы принят референц-эллипсоид Красовского, 1940 г. Эллипсоид Красовского является наиболее точным из всех эллипсоидов, полученных из обработки наземных измерений. Его размеры близки к размерам ОЗЭ, найденным по данным наблюдений ИСЗ.

* имеется в виду среднее положение центра масс и оси вращения в теле Земли

1.3. Основные разделы высшей геодезии; связь дисциплины с другими науками

Высшая геодезия – это обширная область знаний. Она состоит из ряда больших разделов, часть из которых при подробном рассмотрении можно считать самостоятельными дисциплинами. Перечислим основные разделы высшей геодезии.

1. **Основные геодезические работы.** В этом разделе рассматриваются методы точного определения взаимного положения точек земной поверхности путем выполнения высокоточных угловых, линейных и нивелирных измерений (триангуляция, полигонометрия и нивелирование); основная координатная линия, относительно которой производятся указанные измерения, – отвесная линия.

2. **Геодезическая гравиметрия** рассматривает методы измерения ускорения силы тяжести в точках земной поверхности, а также методы учета неоднородности гравитационного поля в результатах геодезических измерений.

3. **Геодезическая астрономия** рассматривает методы определения широт, долгот и азимутов из наблюдений небесных тел.

4. **Космическая или спутниковая геодезия** решает те же задачи, что и высшая геодезия, но при помощи наблюдений искусственных спутников Земли.

5. **Сфероидическая геодезия** рассматривает методы решения геодезических задач на поверхности земного эллипсоида.

6. **Теоретическая геодезия** занимается разработкой теорий и методов решения основной научной задачи высшей геодезии (определение фигуры и внешнего гравитационного поля Земли) и их изменений во времени.

В своих исследованиях высшая геодезия широко использует новейшие достижения физики, математики, астрономии; при разработке высокоточной измерительной техники – прикладной оптики, точного приборостроения, лазерной техники и т.д. При математической обработке результатов измерений применяются теория вероятностей, математическая статистика, способ наименьших квадратов. Все вычисления выполняются на новейших ЭВМ. Для решения научных геодинамических задач необходима тесная взаимосвязь высшей геодезии с геологией, геотектоникой, геофизикой, сейсмологией и т.д.

Лекция 2

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ВЫСШЕЙ ГЕОДЕЗИИ. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ

2.1. Основные системы координат, применяемые в высшей геодезии. Понятие о геодезических и астрономических координатах и азимутах

В высшей геодезии используются следующие системы координат:

- 1) система геодезических координат;
- 2) система прямоугольных пространственных координат;
- 3) система плоских прямоугольных координат;
- 4) система прямоугольных прямолинейных координат x, y , отнесенных к плоскости меридиана данной точки;
- 5) система геоцентрических координат;
- 6) система координат с приведенной широтой и геодезической долготой;
- 7) система прямоугольных сфероидических координат.

В практике геодезических работ наиболее часто используются первые три из перечисленных систем координат, которые мы и рассмотрим более подробно.

Система геодезических координат характеризуется геодезическими широтой B , долготой L , высотой H . Эти величины определяют положение любой точки M земной поверхности в системе принятого референц-эллипсоида (рис. 2.1).

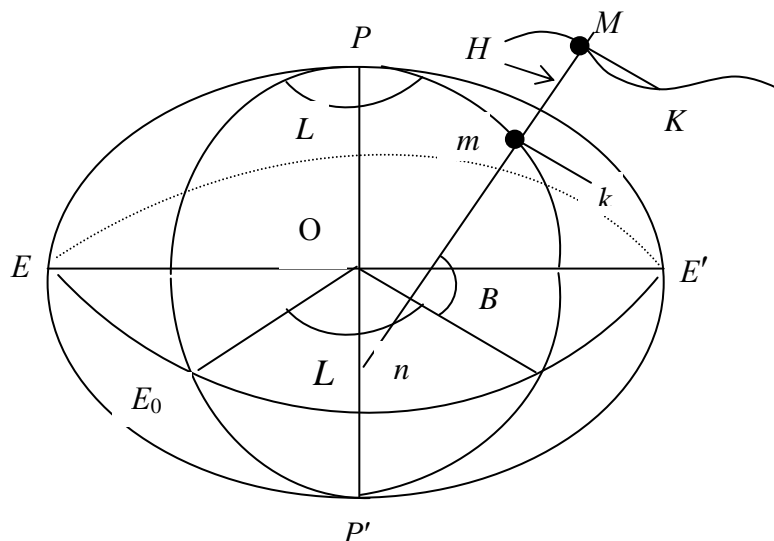


Рис. 2.1. Геодезические координаты B, L, H точки земной поверхности M :
 EE_0E' – плоскость земного экватора; PE_0P' – плоскость Гринвичского или нулевого меридиана; PmP' – плоскость местного геодезического меридиана (проведенного через точку $M(m)$ местности); Mmn – нормаль \vec{n} к эллипсоиду, опущенная из точки M

Геодезической широтой точки $M(m)$ называется острый угол B между плоскостью экватора EE_0E' и нормалью $\vec{n}(Mmn)$ к поверхности эллипсоида в данной точке.

Геодезическая широта изменяется от 0° до $\pm 90^\circ$. Она имеет положительный знак в северном полушарии и отрицательный – в южном.

Геодезической долготой L точки $M(m)$ называется двугранный угол $PmP'E_0$ между плоскостью PE_0P' гринвичского (нулевого) меридиана и плоскостью PmP' местного геодезического меридиана точки $M(m)$. Долготы отсчитываются от начального меридиана и изменяются от 0° до 360° ; в России и Беларуси – с запада на восток, в некоторых странах – наоборот.

Геодезической высотой H точки M местности называется расстояние Mm от поверхности референц-эллипсоида до этой точки, отсчитанное по нормали.

Точки, лежащие выше поверхности эллипсоида имеют положительные высоты, ниже – отрицательные.

Геодезические координаты не могут быть непосредственно измерены.

Астрономические координаты характеризуются астрономической широтой φ и астрономической долготой λ (рис. 2.2).

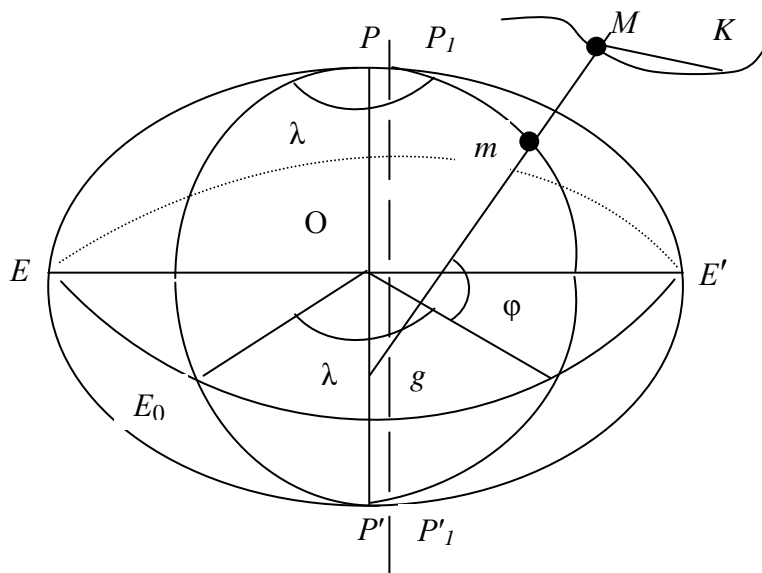


Рис. 2.2. Астрономические координаты φ и λ точки земной поверхности M : EE_0E' – плоскость земного экватора; PE_0E' – плоскость Гринвичского или нулевого меридиана; P_1mP_1' – плоскость местного астрономического меридиана; Mmg – отвесная линия \vec{g} , проходящая через точку M

Астрономической широтой точки $M(m)$ называется острый угол φ между плоскостью земного экватора EE_0E' и отвесной линией Mmg в данной точке.

Астрономическая широта изменяется от 0^0 до $\pm 90^0$. Она имеет положительный знак в северном полушарии и отрицательный – в южном.

Астрономической долготой λ точки $M(m)$ называется двугранный угол между плоскостью PE_0P' гринвичского (нулевого) меридиана и плоскостью астрономического меридиана данной точки. Под плоскостью астрономического меридиана точки понимают плоскость, проходящую через отвесную линию (Mmg) в данной точке и прямую, располагающуюся параллельно оси вращения Земли (в общем случае плоскость астрономического меридиана не проходит через полюсы Земли).

Понятие о геодезическом и астрономическом азимутах

Астрономическим азимутом α направления MK называют угол между северным направлением астрономического меридиана точки наблюдения M и наблюдаемым направлением MK .

Астрономические широты, долготы и азимуты на земной поверхности могут быть определены из наблюдений звезд.

Геодезическим азимутом A направления MK (рис. 2.1) (на земной поверхности) или mk (на эллипсоиде) называют угол между северным направлением геодезического меридиана PmP' точки наблюдения и направлением MK , отредуцированным на поверхность эллипсоида. Геодезический азимут отсчитывают по ходу часовой стрелки от северного направления меридиана, от 0^0 до 360^0 .

Геодезический азимут A_{MK} может быть получен двумя путями:

1) путем передачи азимутов по сторонам геодезической сети, пользуясь исходным азимутом в начальной ее точке, полученным при ориентировании референц-эллипсоида, и углами сети;

2) путем определения астрономического азимута α_{MK} и получения затем геодезического азимута A_{MK} направления MK по формуле

$$A_{MK} = \alpha_{MK} + (L_M - \lambda_M) \sin \varphi_M + \delta_u + \delta_H, \quad (2.1)$$

где L_M – геодезическая и λ_M – астрономическая долготы точки M ;

φ_M – астрономическая широта точки M ;

δ_u и δ_H – редуцированные поправки в направление MK за перенос его с земной поверхности на поверхность референц-эллипсоида, причем δ_u – по-

правка за уклонение отвесной линии от нормали к эллипсоиду в точке M , а δ_H – поправка за высоту визирной цели в точке K над поверхностью эллипсоида. Формулы для вычисления этих малых поправок, учитываемых при высокоточных измерениях, будут даны в лекции, посвященной математической обработке результатов угловых наблюдений.

Геодезический азимут, полученный по формуле (2.1), называют *азимут Лапласа*. Геодезический пункт, на котором были определены астрономические азимут, широта и долгота, называют *пунктом Лапласа*, а поправочный член $(L_M - \lambda_M) \sin \varphi_M$ – *поправкой Лапласа*.

Геодезические координаты B, L и астрономические координаты φ, λ не совпадают между собой вследствие несовпадения в каждой точке Земли направлений нормали и отвесной линии. Сопоставление астрономических и геодезических координат позволяет вычислить астрономо-геодезические уклонения отвесных линий, т.е. угол между нормалью к эллипсоиду и отвесной линией в данной точке.

Система прямоугольных пространственных координат ($OXYZ$) отнесена к центру O земного эллипсоида (рис. 2.3).

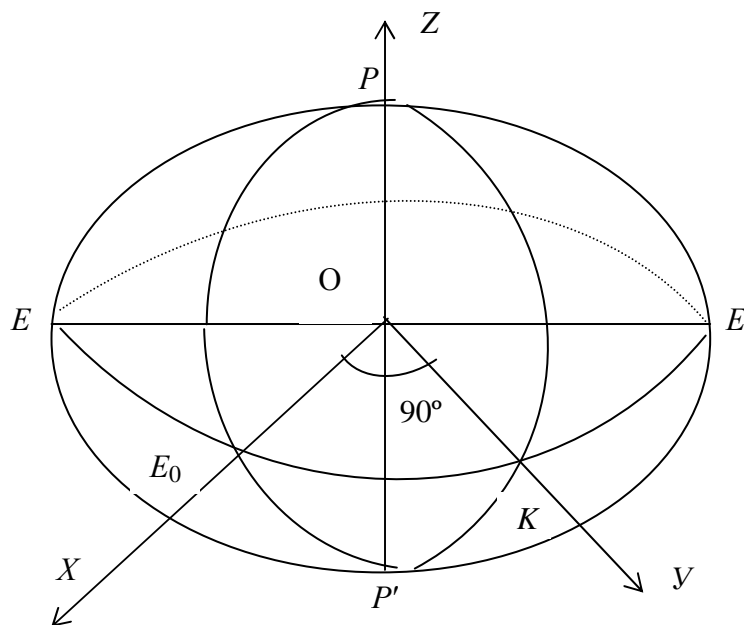


Рис. 2.3. Система прямоугольных пространственных координат $OXYZ$:
 E_0 – точка пересечения Гринвичского меридиана с земным экватором

Ось OZ располагается на полярной оси эллипсоида POP' ; ось OX – в плоскости экватора и начального (Гринвичского) меридиана PE_0P' ;

ось OY – в плоскости экватора, но в меридиане PKP' , плоскость которого составляет с плоскостью Гринвичского меридиана угол в 90^0 .

Данная система координат приобретает все большее значение в геодезии в связи с широким внедрением в практику геодезических работ так называемых спутниковых измерений.

Система плоских прямоугольных координат (x, y)

В странах бывшего Союза *общегосударственная система координат* принята *в проекции Гаусса – Крюгера*, которая получается путем проецирования точек земной поверхности на боковую поверхность цилиндра и развертывания ее в плоскость. Такой метод дал возможность разделить всю поверхность Земли на равновеликие по площади участки, ограниченные меридианами и имеющие протяжение по широте от Северного полюса до Южного (рис. 2.4).

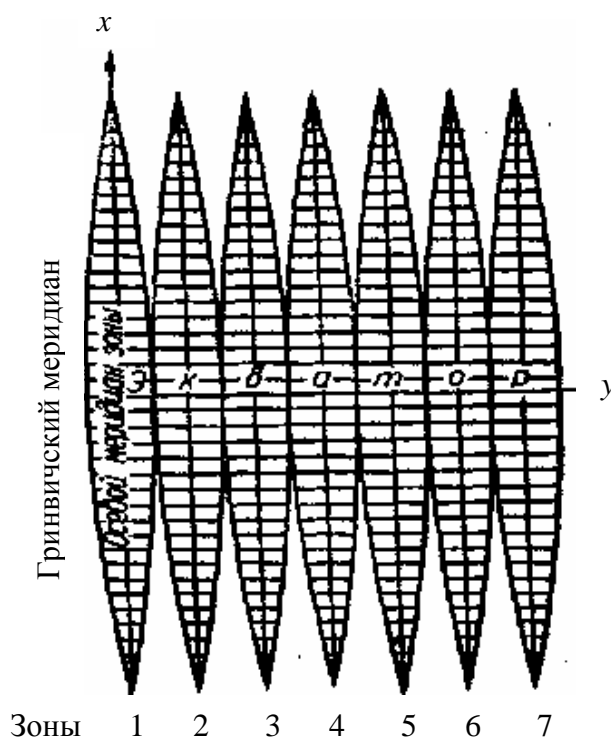


Рис. 2.4. Изображение координатных зон на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера

Под *плоскими прямоугольными координатами Гаусса* понимают систему прямоугольных координат, в которой за начало координат в 6- или 3-градусной зонах принята точка пересечения дуги осевого меридиана зоны с дугой экватора. За ось абсцисс x принято изображение дуги осевого меридиана, за ось ординат y – дуги экватора (рис. 2.5). Слева от условной записи ординат подписывается номер зоны.

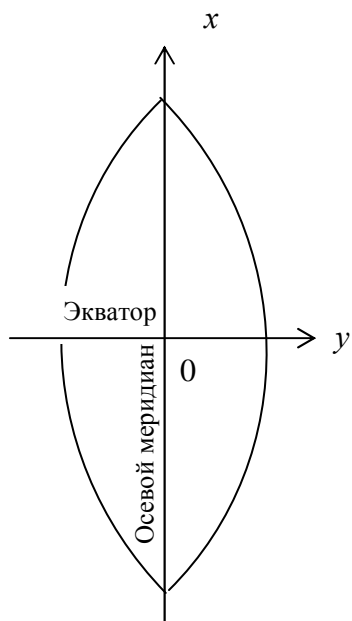


Рис. 2.5. Система плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса:

Действительные значения ординат	Условные записи ординат (используемые на практике)
$y = +152\ 833,5$ м (пятой зоны)	$y = 5\ 652\ 833,5$ м
$y = -127\ 893,6$ м (седьмой зоны)	$y = 7\ 372\ 106,4$ м

Лекция 3 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЯХ

3.1. Классификация геодезических сетей

Геодезические сети представляют собой совокупность пунктов на земной поверхности, имеющих известные плановое положение в избранной системе координат и отметки в принятой системе высот, закрепленных на местности центрами и отмеченных специальными опознавательными знаками.

По *территориальному признаку* геодезические сети бывают *общеземными*, т.е. покрывающими весь земной шар, *государственными*, т.е. создаваемыми в пределах территории каждой отдельной страны в единой системе координат и высот, принятой в данной стране, *сетями сгущения* и *местными сетями*.

По *геометрии* различают *плановые*, *высотные* и *пространственные* сети.

Построение геодезических сетей, как правило, производится *по принципу от общего к частному*, согласно которому сети делятся на классы, разряды и строятся поэтапно. При этом сначала создается сеть более редких пунктов высшего класса, служащих основой для дальнейшего поэтапного сгущения сети низшими классами (т.е. вначале создается 1 класс, который затем сгущается 2, 3, 4 классами и т.д.). Развитие сети высшего класса позволяет в относительно сжатые сроки распространить избранную систему координат на всю территорию государства и создать возможность развития сетей низших классов в отдельных районах, согласуя очередность работ с потребностями народного хозяйства страны.

Общеземные или глобальные геодезические сети в настоящее время создаются методами спутниковой геодезии. Поэтому ее называют космической или спутниковой геодезической сетью. Положение пунктов в этой сети вычисляют в геоцентрической системе прямоугольных пространственных координат X, Y, Z , начало которой совмещено с центром масс Земли (см. рис. 2.3). Глобальные геодезические сети используют для решения научных и научно-технических задач высшей геодезии, геодинамики, астрономии и других наук.

Геодезическая сеть Беларуси создана в советское время и является частью геодезической сети СССР. Состав ее представлен на рис. 3.1, из которого следует, что сеть подразделяется на 4 группы (согласно классификации 1961 г.).



Рис. 3.1. Геодезическая сеть СССР и Беларуси

Сформулируем цели и задачи, решаемые каждой из представленных на рис. 3.1 геодезических сетей.

3.2. Назначение геодезических сетей

Государственная плановая геодезическая сеть предусматривает определение с наивысшей точностью взаимного положения геодезических пунктов в плановом отношении на выбранной поверхности относимости (референц-эллипсоиде или плоскости); высоты пунктов этой сети определяются с гораздо более низкой точностью, особенно в горных районах.

Государственная нивелирная сеть служит для определения с наивысшей точностью высоты нивелирного пункта относительно поверхности квазигеоида; плановое положение пункта этой сети на поверхности относимости определяется приближенно.

Государственная гравиметрическая сеть предназначена для определения с наивысшей точностью ускорений силы тяжести на пунктах; плановое и высотное положение пунктов этой сети должно быть определено с требуемой точностью.

Государственные геодезические сети создаются на территории каждой отдельной страны со следующими целями:

- для детального изучения фигуры и гравитационного поля Земли, их изменений во времени (в пределах территории страны);
- распространения единой системы координат и высот на территории всей страны;
- картографирования территории страны в разных масштабах в единой системе координат и высот;
- решения геодезическими методами разного рода научных и инженерно-технических задач народного хозяйства.

Государственные геодезические сети всех трех видов строятся отдельно, но они тесно взаимосвязаны и дополняют друг друга. Отдельные пункты этих сетей могут быть общими для всех трех видов, что позволяет более эффективно решать многие задачи геодезии, геодинамики и т.д.

Пункты государственных геодезических сетей надежно закрепляются на местности долговременными центрами. По точности эти сети должны находиться на уровне современных требований и ближайшего будущего. Поэтому через 25 – 30 лет выполняют так называемое обновление государственных геодезических сетей, т.е. производится восстановление утраченных пунктов, а также выполняются повторные геодезические измерения и уравнивание сетей на базе новейших измерительных и вычислительных достижений.

Геодезические сети сгущения (ГСС) создаются для обоснования топографических съемок масштаба 1:5000 – 1:500 и инженерно-геодезических работ.

Местные геодезические сети создаются на локальных участках местности, на которых необходимо решить сложные научные или инженерно-технические задачи, требующие определения взаимного положения точек в плане и по высоте с наивысшей точностью на каждый момент времени. В этих случаях создают специальные геодезические сети предельно высокой точности и выполняют в них прецизионные измерения повторно через определенные интервалы времени. Математическую обработку измерений в таких сетях выполняют в местной системе координат, подбираемой таким образом, чтобы редуцированные поправки за переход от измеренных величин к их проекциям на местную поверхность относимости были как можно меньше. Такие сети используют, например, в сейсмоактивных районах для поиска предвестников и последующего прогноза землетрясений, при строительстве и эксплуатации мощных радиотелескопов, ускорителей элементарных частиц, гидроэлектростанций, теплоэлектростанций и т.д. Таким образом, в состав местных геодезических сетей входят также **высокоточные инженерно-геодезические сети**. Обычные же инженерно-геодезические опорные сети, используемые, например, при трассировании линейных сооружений, обслуживании строящихся объектов и т.д., как правило, развиваются от ближайших пунктов государственных геодезических сетей и сетей сгущения.

3.3. О плотности и точности построения ГГС

При создании ГГС в каждой стране возникают три основных вопроса:

- выбор схемы построения ГГС;
- установление необходимой плотности пунктов сети или площади обслуживания одним пунктом;
- установление необходимой точности, с которой определяется взаимное положение смежных пунктов сети.

Данные три вопроса решаются, исходя из основных целей создания опорных геодезических сетей (решение главной научной задачи высшей геодезии; картографирование территории страны в единой системе). Для достижения обеих целей необходимо, чтобы ГГС была сплошной, достаточно равномерно покрывающей всю территорию страны. Причем, это требование должно выполняться на этапе создания *астрономо-геодезической сети* (плановой ГГС 1 и 2 классов, являющейся наиболее точной и используемой при решении главной научной задачи высшей гео-

дезии). Сплошность сети наиболее удобно обеспечивает система пунктов, образующих треугольники. Она и используется чаще всего при проектировании опорных геодезических сетей.

Так как ГГС создается в соответствии с принципом перехода от общего к частному, то между средними значениями длин сторон треугольников при переходе от одного класса триангуляции к другому должны быть соблюдены определенные соотношения (табл. 3.1).

Если предположить, что сеть состоит из равносторонних треугольников, то эти соотношения будут следующими:

S_1, S_2, S_3, S_4 – длины сторон триангуляции соответственно 1, 2, 3 и 4 классов.

$$S_2 = S_1 / \sqrt{3} = 0,58S_1; \quad S_3 = S_2 / \sqrt{3} = 0,33S_1; \quad S_4 = S_3 / \sqrt{3} = 0,19S_1.$$

Принимая среднее значение $S_1 = 23$ км, длины сторон S_2, S_3, S_4 будут

Таблица 3.1

Класс	$S, \text{км}$	Площадь обслуживания одним пунктом, км^2 $P = 0,78 S^2$
2	13,3	138,0
3	7,6	45,0
4	4,4	15,1

Кроме того, при определении плотности пунктов решающее значение имеет задача общегосударственного картографирования всей страны, которая ставит в прямую зависимость плотность сети от масштаба съемки, методов ее выполнения и методов создания съемочного обоснования. Представление о нормах плотности пунктов в зависимости от масштаба съемки можно получить из табл. 3.2.

Таблица 3.2

Масштаб съемки	Площадь съемочной трапеции, км^2	Площадь обслуживания одним пунктом $P, \text{км}^2$	$S, \approx \sqrt{P},$ км
1:25 000	75	50 – 60	7 – 8
1:10 000	18		
1:5 000	4.5	20 – 30	4 – 6
1:2 000	1.1	5 – 15	2 – 4

Как видим, чем крупнее масштаб съемки, тем выше плотность пунктов и, соответственно, тем меньше расстояние между пунктами. Сопоставляя данные табл. 3.1 и 3.2, можно сказать, что съемку масштаба 1:25 000 – 1:10 000 может обеспечить триангуляция 3 класса, 1:5 000 – 4 класса, а масштаба 1:2 000 – 4 класса в совокупности с сетями сгущения.

Точность построения ГГС

Для решения научных проблем астрономо-геодезическую сеть (АГС) страны необходимо создавать с наивысшей при массовых измерениях точностью и непрерывно совершенствовать.

Для решения задачи общегосударственного картографирования вплоть до масштаба 1:2 000 требуется, чтобы точность определения стороны между смежными пунктами ГГС удовлетворяла соотношению

$$m_s \leq 0,25m \cdot M, \quad (3.1)$$

где m_s – СКО определения стороны;

m – графическая точность карты;

M – знаменатель масштаба топографической карты.

Приняв $m = 0,2$ мм на карте, вычислим по формуле (3.1) допустимые ошибки m_s определения длин сторон между смежными пунктами ГГС для различных масштабов (табл. 3.3).

Таблица 3.3

**Зависимость допустимых ошибок m_s сторон ГГС
от масштаба топографической карты**

Масштаб	1:25 000	1:10 000	1:5 000	1:2 000	1:1 000
Графическая точность карты, м	5,0	2,0	1,0	0,4	0,2
m_s доп., м	1,25	0,5	0,25	0,10	0,05

В нашей стране наиболее крупным государственным масштабом карты является 1:2 000. Следовательно, точность определения стороны ГГС должна быть не хуже 10 см.

Лекция 4

МЕТОДЫ, ПРОГРАММЫ СОЗДАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

4.1. Методы построения плановых геодезических сетей

Плановые геодезические сети могут быть созданы наземными и спутниковыми методами. К наземным методам создания этих сетей относятся методы *триангуляции*, *полигонометрии* и *трилатерации*, а также методы геодезических засечек и проложения теодолитных и мензульных ходов. Последние три метода используются исключительно в топографии и инженерной геодезии. Поэтому в рамках данного курса ограничимся рассмотрением триангуляции, трилатерации и полигонометрии, а также идеи спутникового метода, ставшего в последние годы основным при создании плановых государственных геодезических сетей. Дадим краткую характеристику каждого метода.

В методе *триангуляции* на командных высотах местности закрепляют систему геодезических пунктов, образующих сеть треугольников (рис. 4.1). В каждом треугольнике этой сети измеряют все три горизонтальных угла β . Результаты угловых измерений в сети триангуляции подвергаются специальной математической обработке, в процессе которой получают уравненные значения плановых координат пунктов. Для определения плановых координат пунктов в сети триангуляции должны быть известны как минимум координаты x , y одного пункта сети, длина базисной стороны b и дирекционный угол α этой стороны. Для контроля число исходных данных может быть увеличено. Так на рис. 4.1 показано, что в качестве исходных заданы координаты x , y пункта A , дирекционные углы α_1 , α_2 и длины b_1 , b_2 сторон AB и CD (базисов). Сеть триангуляции может быть построена в виде отдельного ряда треугольников, системы рядов треугольников, а также в виде сплошной сети треугольников. Элементами сети триангуляции могут служить не только *треугольники*, но и более сложные фигуры: *геодезические четырехугольники* и *центральные системы*.

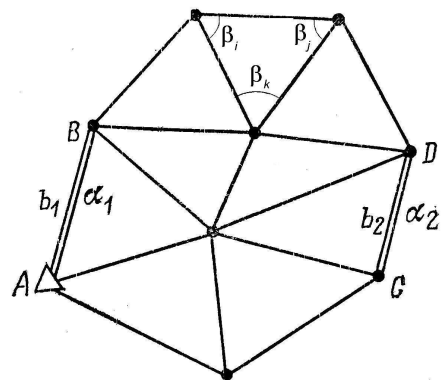


Рис. 4.1. Сеть триангуляции:

● – определяемые пункты триангуляции; β_i , β_j , β_k – измеренные углы в треугольнике; ΔA – исходный пункт триангуляции; α_1 , α_2 – исходные дирекционные углы; b_1 , b_2 – исходные базисы

Основными *достоинствами метода триангуляции* являются:

- оперативность и возможность использования в разнообразных физико-географических условиях;
- большое число избыточных измерений в сети, позволяющих непосредственно в поле осуществлять надежный контроль измерения углов по невязкам треугольников, так как известно, что сумма углов треугольника равна 180^0 , т.е.

$$W = \beta_i + \beta_j + \beta_k - 180^0, \quad (4.1),$$

где W – невязка треугольника;

$\beta_i, \beta_j, \beta_k$ – измеренные углы треугольника. (Допустимые значения невязок треугольников для каждого класса и разряда триангуляции устанавливаются соответствующими инструкциями);

- высокая точность определения взаимного положения смежных пунктов в сети, особенно сплошной.

Основными *недостатком метода триангуляции* является высокая стоимость работ из-за необходимости постройки наружных знаков с целью открытия видимости между пунктами сети.

Метод триангуляции получил наибольшее распространение при построении государственных геодезических сетей наземными способами, а также при развитии инженерно-геодезических сетей.

В методе *трилатерации*, как и в методе триангуляции, предусматривается создание на местности сети треугольников. Однако вместо углов в *трилатерации измеряются стороны треугольника*. Для получения координат пунктов в сети трилатерации необходимо иметь как минимум координаты x, y одного пункта сети и дирекционный угол α одной из сторон сети, т.к. масштаб сети задается всеми измеренными сторонами.

По ряду причин метод трилатерации в чистом виде не получил широкого распространения, однако при создании специальных геодезических сетей повышенной точности, например, плановых сетей на геодинамических полигонах, он широко применяется в сочетании с триангуляцией, т.е. создаются линейно-угловые сети, когда в треугольниках измеряются углы и линии.

Сущность *метода полигонометрии* заключается в следующем. На местности закрепляют систему геодезических пунктов, образующих вытянутый одиночный ход (рис. 4.2) или систему пересекающихся ходов, образующих сплошную сеть. Между смежными пунктами хода измеряют длины сторон S_i , а на пунктах – углы поворота β_i . Конечные пункты полигонометрии являются исходными, т.е. с известными плановыми координатами x, y . На них измеряют примычные углы γ_A и γ_B между твердыми и оп-

ределяемыми сторонами. Для твердых сторон должны быть известны дирекционные углы, с помощью которых задается ориентирование полигонометрического хода.

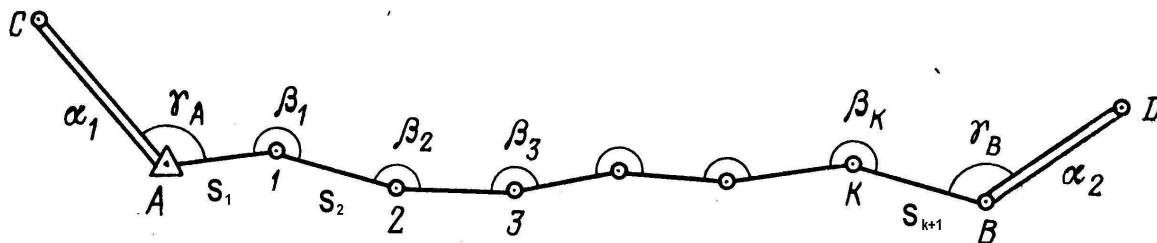


Рис. 4.2. Полигонометрический ход:

A, B – исходные пункты хода полигонометрии; AC, BD – твердые или исходные направления; α_1, α_2 – исходные дирекционные углы; γ_A, γ_B – примычные углы; $\circ 1, 2, 3, \dots, k$ – определяемые пункты; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ – измеренные углы; S_1, S_2, \dots, S_{k+1} – измеренные стороны

Применение метода полигонометрии выгодно в закрытой местности (например, в залесенной местности или на застроенных территориях), т.к. требует строительства значительно меньшего числа дорогостоящих геодезических знаков по сравнению с триангуляцией для открытия видимости между пунктами. Однако при создании государственных плановых геодезических сетей высшего класса он менее выгоден, чем триангуляция, потому что имеет значительно меньшее число избыточных измерений, слабые полевые контроли, а, следовательно, меньшую точность. Метод полигонометрии получил очень широкое распространение при создании сетей сгущения, включая и инженерно-геодезические сети.

Понятие о спутниковых методах создания геодезических сетей

В настоящее время при определении координат точек земной поверхности из наблюдений искусственных спутников Земли (ИСЗ) применяют, в основном, *геометрический* и *динамический* методы. В геометрическом методе ИСЗ используются как пассивные визирные цели, например, при синхронных измерениях расстояний с исходных и определяемых пунктов до ИСЗ. В случае динамического метода ИСЗ являются носителями координат, по которым можно автономно определить координаты точки земной поверхности. Точность динамического метода для создания опорных геодезических сетей в настоящее время является недостаточной, поэтому поясним идею развития этих сетей на примере геометрического метода спутниковых наблюдений для одного треугольника $i_1 i_2 j$ плановой геодезической сети (рис. 4.3).

Устанавливаем три спутниковых приемника в пунктах i_1, i_2, j на земной поверхности, далее выполняем синхронные наблюдения со всех трех пунктов вначале на положение ИСЗ k_1 , затем на k_2 и далее на k_3 . Из $\Delta i_1 i_2 k_1, \Delta i_1 i_2 k_2$ и $\Delta i_1 i_2 k_3$ по формулам прямой геодезической засечки находим координаты спутника в точках k_1, k_2 и k_3 . Затем из построения $k_1 k_2 k_3 j$ по формулам обратной геодезической засечки определяем координаты определяемого пункта j . Как правило, в результате предварительной обработки по программам, сопровождающим спутниковые приемники, получают приращения пространственных координат между пунктами геодезической сети, которые в дальнейшем используют при уравнивании сети как измеренные величины. При необходимости пространственные координаты пунктов, полученные после уравнивания, перевычисляют в плоские прямоугольные координаты.

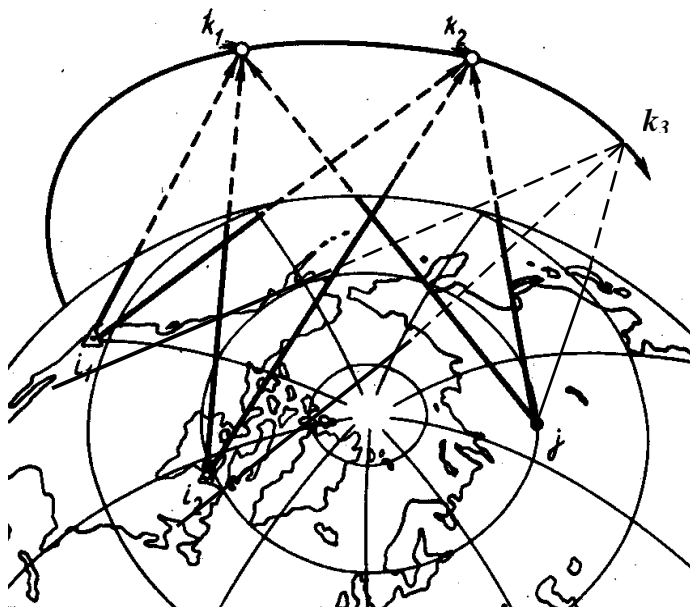


Рис. 4.3. Геометрический метод определения координат пунктов геодезической сети:

$\Delta i_1 i_2 j$ – треугольник геодезической сети; i_1, i_2 – исходные пункты геодезической сети; j – определяемый пункт геодезической сети; k_1, k_2, k_3 – положения ИСЗ

4.2. Схемы и программы построения существующих опорных геодезических сетей

Плановая опорная сеть. В советский период существовало две программы построения государственной плановой сети:

1. Программа построения государственной триангуляции Ф. Н. Красовского, которая изложена в «Основных положениях о построении государственной опорной геодезической сети СССР 1939 г.»;

2. Программа построения государственной геодезической сети СССР, опубликованная в «Основных положениях о построении государственной геодезической сети СССР 1954 – 1961 гг.» и в «Инструкции о построении государственной геодезической сети 1966 г.».

Созданная государственная плановая геодезическая сеть по программе Ф. Н. Красовского по точности была достаточной для топографических съемок только вплоть до масштаба 1:10 000. Однако сразу же в послевоенные годы возникла необходимость картографирования территории в масштабах 1:5 000 и 1:2 000. Поэтому, начиная с шестидесятых годов прошлого века, стала реализовываться вторая программа построения ГГС, согласно которой ГГС СССР является главной геодезической основой топографических съемок всех масштабов вплоть до масштаба 1:2 000 и должна удовлетворять требованиям народного хозяйства и обороны страны при решении соответствующих научных и инженерно-технических задач. Она создается методами триангуляции, полигонометрии, трилатерации или их сочетаниями, что определяется требованиями точности и экономичности. Построение ГГС осуществляется в соответствии с принципом перехода от общего к частному.

Существующая государственная геодезическая сеть Беларуси является частью государственной геодезической сети СССР, которая создана в соответствии со второй программой и усовершенствована к 1991 г. в результате совместного уравнивания сетей триангуляции 1 и 2 классов.

Государственная геодезическая сеть подразделяется на сети 1, 2, 3 и 4 классов, различающиеся между собой точностью измерения углов и расстояний, длиной сторон сети и очередностью последовательного развития. Основной является геодезическая сеть 1 класса, которая строится в виде полигонов периметром порядка 800 км. Каждый полигон состоит из четырех звеньев астрономо-геодезической сети, располагаемых в направлении меридианов и параллелей (рис. 4.4).

При этом каждое звено представляет собой ряд триангуляции или полигонометрии протяженностью порядка 200 км. На концах каждого звена 1 класса организуют астробазис с двумя *пунктами Лапласа* (пункты, на которых выполнены определения астрономических широты, долготы и азимута направления между ними). В середине каждого звена 1 класса создаются еще промежуточные астропункты, на которых определяют только астрономические широту и долготу, т.е. φ и λ . Вдоль всех первоклассных рядов выполняют гравиметрическую съемку, а вокруг астропунктов – гравиметрическую съемку сгущения.

Звено триангуляции 1 класса состоит, в основном, из треугольников с углами не менее 40^0 и сторонами порядка 25 – 30 км. Базисы, как правило, устраивают на концах звена между пунктами Лапласа. Измерение длин базисов выполняется высокоточными светодальномерами. С помощью астрономических азимутов задается ориентировка сети, по базисам осуществляется ее масштабирование, а результаты определения астрономических широт, долгот и гравиметрической съемки используются при решении задачи редуцирования на поверхность относимости при математической обработке геодезических данных.

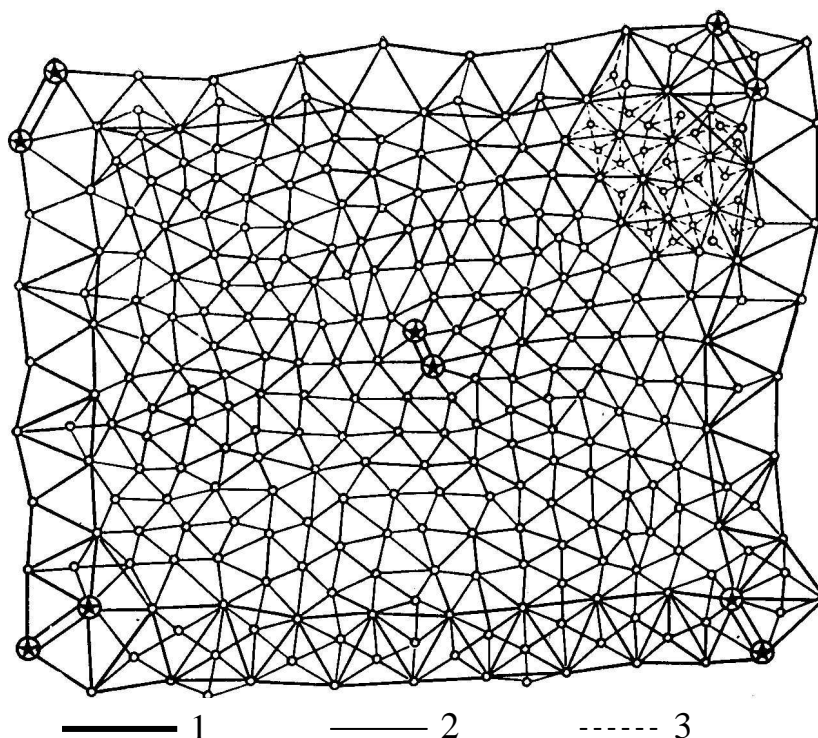


Рис. 4.4. Схема построения триангуляции 2 – 4 классов внутри полигона 1 класса:

★ – астрономические пункты Лапласа, на которых измеряются астрономические широта, долгота и азимут направления между пунктами;
 ★—★ – астробазис, т.е. два пункта Лапласа, между которыми измерено расстояние с высокой точностью;

1 – сторона триангуляции 1 класса; 2 – сторона триангуляции 2 класса; 3 – сторона триангуляции 3 класса. (Триангуляция 4 класса на рис. не показана.)

Звенья полигонометрии 1 класса прокладывают в виде вытянутых ходов, состоящих не более, чем из 10 сторон длиной ~ 20 км. Точность первоклассных измерений характеризуется величинами:

$$m_{\alpha} = \pm 0,5''; m_{\lambda} = 0,45''; m_{\varphi} = 0,3''; m_{\beta} = \pm 0,7''; m_s / S = 1 : 400\,000.$$

В дальнейшем первоклассные полигоны заполняются сплошной сетью триангуляции 2 класса. Длины сторон треугольников 2 класса равны в среднем 10 – 15 км. Угол в треугольнике 2 класса должен быть не менее 30° . В триангуляции 2 класса равномерно через 25 треугольников размещают базисы, длины которых определяют с ошибкой не ниже 1:400 000. Одна из базисных сторон должна находиться примерно в центре полигона 1 класса, на концах этой стороны определяют пункты Лапласа с той же точностью астрономических измерений, что и в триангуляции 1 класса. Углы во 2 классе измеряют со средней квадратической ошибкой не ниже $1''$.

Сеть триангуляции 2 класса сгущается сетями 3 и 4 классов, которые, как правило, создаются методами триангуляции.

Сети триангуляции 3 и 4 класса строят в виде жестких систем сплошных треугольников, вставляемых в сеть триангуляции 2 класса.

На каждом пункте ГГС всех классов на расстоянии от него 0,25 – 1 км устанавливается по 2 ориентирных пункта, которые закрепляют центрами. Ориентирные пункты необходимы для азимутальной привязки съемочных ходов, для военных и других целей, а также для поиска центра пункта триангуляции при утрате наружного знака.

Высоты всех пунктов плановой ГГС определяют преимущественно из тригонометрического нивелирования.

Технические характеристики ГГС СССР, созданной в соответствии с «Основными положениями 1954 – 1961 гг.» представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Технические характеристики ГГС СССР,
созданной в соответствии с «Основными положениями 1954 – 1961 гг.»**

Класс сети	Длина стороны, км	СКО измеренного угла m_{β}	Ошибка стороны в слабом месте m_s / S	Ошибка определения взаимного положения смежных пунктов, м
1	20 – 25	0,7	1/150 000	~ 0,15
2	7 – 20	1,0	1/200 000	~ 0,06
3	5 – 8	1,5	1/120 000	~ 0,06
4	2 – 5	2,0	1/70 000	~ 0,06

По своей точности она обеспечивает картографирование территории нашей страны в масштабе 1:2 000, а также позволяет решать научные и инженерно-технические задачи на высоком уровне.

4.3. Совершенствование ГГС СССР и Беларуси

Плановая ГГС СССР, созданная в соответствии с «Основными положениями 1954 – 1961 гг.», характеризуется высокой точностью определения взаимного положения смежных пунктов. Однако несмотря на это, ас-

трономо-геодезическая сеть 1 класса менее точна, чем опирающаяся на нее сеть 2 класса, а должно быть наоборот. Это приводит к тому, что сети 2 класса, уравниваемые внутри полигона 1 класса, элементы которого принимаются за исходные данные, несколько деформируются. При этом наиболее ощутимые искажения сети 2 класса наблюдаются вблизи сторон треугольников 1 класса. Эти искажения затем быстро уменьшаются по мере удаления от треугольников 1 класса по направлению к центру каждого полигона вследствие большой геометрической жесткости сплошных сетей триангуляции 2 класса.

Для устранения указанного недостатка сети 1 и 2 классов необходимо уравнивать совместно по методу наименьших квадратов, используя все измеренные в них горизонтальные направления, азимуты и базисы с учетом их весов. В результате будет получена сплошная АГС, покрывающая всю территорию страны.

Практическая реализация этой идеи началась со 2 марта 1979 г. после утверждения в ГУГК «Основных положений по общему уравниванию АГС», разработанных ЦНИИГАиК, НИИ ВТС и Московским АГП. К 1991 году совместное уравнивание 1 и 2 классов было завершено. Уравнивание выполнялось по методу сопряженных градиентов, по программе Г.Н. Ефимова. В уравниваемую сеть АГС вошло 164 306 пунктов, в основном, триангуляционных, 340 – полигонометрии, 280 – трилатерации, 162 пункта – из наблюдений американской спутниковой системы «Транзит». 90 % всех измерений было произведено геодезическими подразделениями ГУГК СССР. Уравнивание выполнялось на поверхности референц-эллипсоида Красовского. Характеристики АГС после уравнивания представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Характеристики АГС СССР, полученные после уравнивания 1991 г.

Наименование характеристики точности АГС		Значения характеристики точности АГС, полученной в результате совместного уравнивания сетей 1 и 2 классов
СКО направления в рядах		0,52"
СКО направления в сетях		0,75"
СКО азимута		1,27"
Ошибка стороны в слабом месте $\frac{m_s}{S}$	ряда	1/377 000
	сети	1/246 000
СКО взаимного положения пунктов, м	ряда	≤ 0,07
	сети	≤ 0,05
СКО передачи координат от Пулково до Берингова пролива, м	m_x	1,02
	m_y	1,10

Высокая точность распространения единой системы координат на всю территорию страны методами классической астрономо-геодезии была подтверждена данными, полученными из космической геодезической сети (КГС). По общим пунктам АГС и КГС средние квадратические расхождения координат по осям составили 0,90 и 0,98 м. Кроме того, в 1992 году в районе Актюбинска французские геодезисты определили на 14 пунктах плановой ГГС разности координат спутниковыми приемниками «Тримбл» и «Транзит». Расхождения в длинах линий получились от 8 до 29 мм, а в разностях координат 19 – 40 мм, что свидетельствует о высокой точности геодезических работ, выполненных наземными методами при развитии плановой ГГС.

Задача, поставленная по общему уравниванию АГС, была выполнена в период с 1980 по 1991 гг. Соединенные штаты Америки затратили на подобную работу при уравнивании АГС, охватывающую северную Америку, Канаду и Мексику, примерно такое же время.

Уравниванием АГС 1980 – 1991 гг. завершен 1-ый этап совершенствования АГС СССР.

На 2-ом этапе планируется создание на основе существующей сети *государственной геодезической спутниковой сети*. Эта работа ведется сейчас как в России, так и в Беларуси. Согласно нормативным документам по второму этапу совершенствования ГГС в обеих странах планируется *три уровня государственной геодезической спутниковой сети*:

- фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС);
- высокоточная астрономо-геодезическая сеть (ВАГС);
- спутниковая геодезическая сеть 1 класса (СГС-1).

ФАГС является высшим звеном государственной геодезической спутниковой сети. Основными функциями ФАГС являются:

- задание и оперативное воспроизведение общеземной геоцентрической системы координат;
- экспериментальное выявление и учет деформирующего влияния геодинамических процессов на стабильность координатной основы;
- метрологическое воспроизведение перспективных запросов практики.

ФАГС реализуется в виде системы закрепленных на земной поверхности пунктов с периодически определяемыми через каждые 5 – 8 лет в единой системе координатами. Пункты ФАГС равномерно размещаются на территории страны со средними расстояниями между ними от 700 до 800 км. Для России общее число пунктов ФАГС составляет 50 – 70.

Взаимное положение пунктов ФАГС должно быть определено с относительной погрешностью порядка $(1 - 2) \cdot 10^{-8}$, т.е. с абсолютной ошибкой порядка 1 – 2 см.

Техническое оснащение работ по созданию ФАГС должно обеспечить не только предельно высокую точность взаимного положения пунктов, но и их связь с центром масс Земли. Часть пунктов ФАГС (для России 10 – 15) должны быть постоянно действующими геодинамическими обсерваториями, на которых осуществляется мониторинг всего комплекса измерений (наземных – угловых, линейных, нивелирных, астрономических, гравиметрических и спутниковых).

ВАГС должна представлять однородное по точности пространственное построение с расстоянием между смежными пунктами 150 – 300 км. Для России число пунктов ВАГС равно 500 – 700. Часть из них должны быть совмещены с пунктами ФАГС. Взаимное положение пунктов ВАГС должно быть определено с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-7}$, что может быть достигнуто с помощью выполнения измерений стандартными двухчастотными спутниковыми приемниками при условии уточнения орбит используемых ИСЗ.

Одной из основных целей развития ВАГС является создание основы для высокоточного определения высот квазигеоида на всей территории страны. Для этого пункты ВАГС должны быть привязаны к государственной нивелирной сети с точностью порядка 5 см.

СГС-1 является той основой, которая будет непосредственно использоваться при повседневном решении любых координатных задач с точностями, лимитируемыми только точностными возможностями используемой спутниковой аппаратуры. Средние расстояния между смежными пунктами СГС-1 равны 30 – 35 км с увеличением в малообжитых районах до 40 – 45 км. Общее число пунктов СГС-1 на территории России составит 12 000 – 15 000. СГС-1 должна быть совмещена с существующей ГГС, построенной наземными методами, и основываться, как правило, на ее уже заложенных центрах. Кроме того, пункты СГС-1 должны быть совмещены с пунктами ВАГС. Пункты СГС-1 могут использоваться кроме традиционных целей также для решения навигационных задач.

Лекция 5

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ ПЛАНОВОЙ ГГС. ЗАКРЕПЛЕНИЕ ПУНКТОВ НА МЕСТНОСТИ. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ЦЕНТРЫ. УГЛОМЕРНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

5.1. Последовательность выполнения работ по созданию плановой ГГС

Государственная геодезическая сеть представляет собой сложное инженерное сооружение, создаваемое по специальной методике. Последовательность работ по ее созданию следующая:

- 1) проектирование сети на картографических материалах;
- 2) рекогносцировка пунктов запроектированной сети с целью наилучшего ее приспособления к условиям местности;
- 3) постройка геодезических наружных знаков и закладка подземных центров;
- 4) производство полевых измерений (измерение горизонтальных углов, базисных сторон; астрономические определения широт, долгот и азимутов; гравиметрическая съемка вокруг астропунктов и вдоль рядов 1 класса; определение высот центров пунктов сети над уровнем моря при помощи тригонометрического и геометрического нивелирования; спутниковые наблюдения);
- 5) математическая обработка результатов измерений, конечным продуктом которой является каталог координат и высот пунктов ГГС.

5.2. Закрепление пунктов на местности

На каждом пункте геодезической сети закладывают центр, тип которого выбирается в зависимости от физико-географических условий района работ. Главным фактором, определяющим конструкцию центра, является состав и глубина промерзания грунта. Центры пунктов плановой ГГС, как правило, закладывают двойными, чтобы разрушение верхнего центра не привело к потере пункта. Все типы центров устанавливаются инструкцией. Их чертежи даны в специальном альбоме типов центров.

Центры классифицируются по следующим разделам:

1. Центры для районов с глубиной промерзания до 1,5 м.
2. Центры для районов с глубиной промерзания более 1,5 м.
3. Центры для районов вечной мерзлоты.
4. Центры скальные.
5. Центры для районов сыпучих песков.
6. Специальные центры.

Геодезические знаки. Для открытия взаимной видимости между соседними пунктами плановой геодезической сети при наблюдении наземными методами, а также с целью обозначения заложенного центра на местности над ним сооружают геодезический знак требуемой высоты с визирным цилиндром, столиком для установки измерительных приборов и площадкой для наблюдателя.

В геодезической практике используются следующие типы геодезических знаков: тур, пирамида (простая и со штативом), простой сигнал, сложный сигнал. Чертежи всех типов знаков даны в инструкции. Схематически они представлены на рис. 5.1 – 5.4.

При наблюдениях с тура и простой пирамиды измерения выполняются с земли. В остальных случаях площадка для наблюдателя поднята над землей на необходимую высоту. Сложные сигналы достигают высоты 20 – 30 м и даже более.

К геодезическим сигналам предъявляют следующие требования: они должны быть прочными, устойчивыми и жесткими.

Для производства угловых измерений в верхней части геодезического знака вертикально устанавливают визирную цель. Очень важно, чтобы конструкция визирной цели была малофазной, т.е. такой, чтобы систематические ошибки угловых измерений, возникающие из-за различия освещенности ее поверхности лучами Солнца, были близки к нулю. Этому требованию лучше всего удовлетворяют малофазные визирные цели конструкции Шишкина, которые представляют собой цилиндр с радиально установленными пластинами, создающими равномерное теневое затемнение почти всей его поверхности (рис. 5.5). Размеры визирного цилиндра зависят от длин сторон триангуляции.

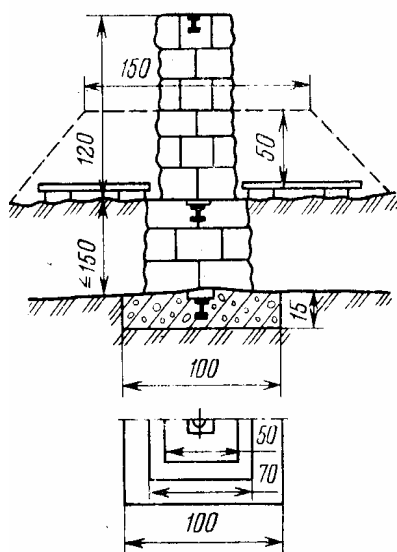


Рис. 5.1. Тур на геодезическом пункте

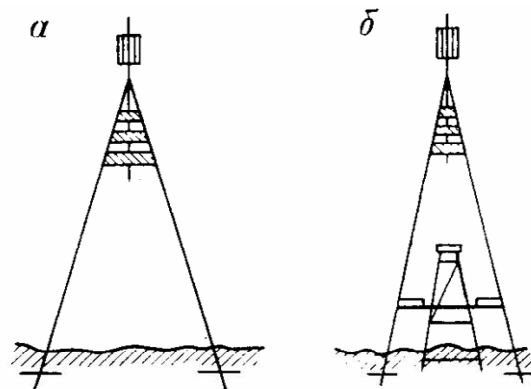


Рис. 5.2. Простая пирамида (а) и пирамида со штативом (б)

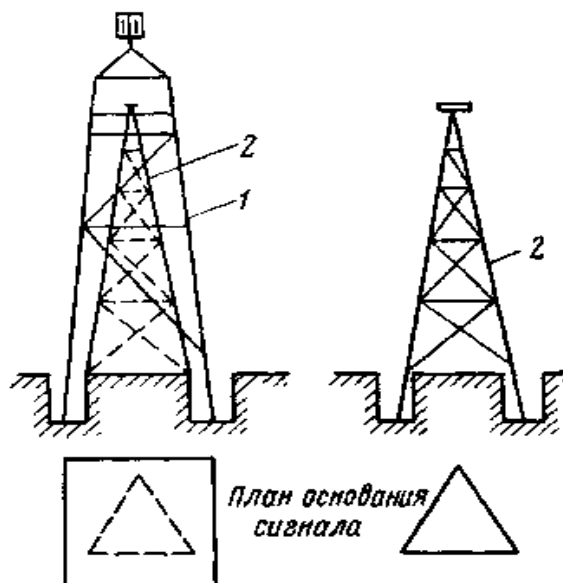


Рис. 5.3. Простой сигнал

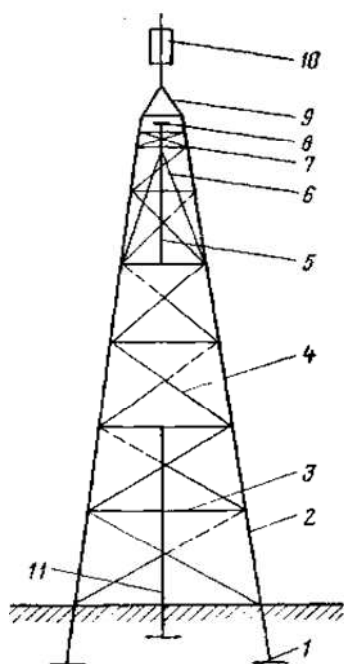


Рис. 5.4. Сложный сигнал:
1 – 6, 9, 11 – элементы конструкции сигнала;
7 – площадка для наблюдателя;
8 – столик; 9 – визирный цилиндр

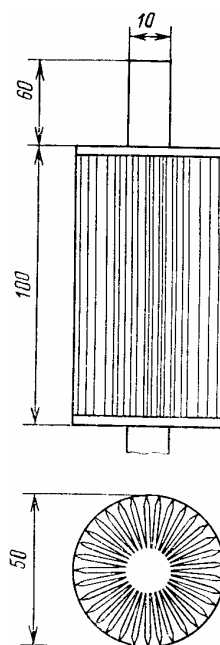


Рис. 5.5. Малофазный визирный цилиндр конструкции Шишкина
(размеры в см)

При создании ГГС спутниковыми методами наружные геодезические знаки строятся только с целью обнаружения центра знака на местности.

5.3. Высокоточные теодолиты

При создании государственной геодезической сети методами триангуляции и полигонометрии на всех пунктах измеряют горизонтальные углы и зенитные расстояния; на пунктах Лапласа выполняют астрономические определения широт, долгот и азимутов, для чего измеряют зенитные расстояния наблюдаемых звезд и горизонтальные углы между звездами и земными предметами, азимуты которых определяются.

Для производства угловых измерений и астрономических определений в государственной геодезической сети используют угломерные приборы разного вида и разной точности. По видам угломерные приборы делятся на *теодолиты* и *астрономические теодолиты*. К конструкциям этих приборов предъявляют следующие *основные требования*:

- 1) соответствие заданной точности;
- 2) стабильность результатов измерений, надежность в работе;
- 3) высокая производительность, простота и удобство пользования прибором;
- 4) малая масса и размеры, унификация узлов и деталей;
- 5) возможность работы в различных климатических условиях и в разное время суток;
- 6) простота внешнего вида, отвечающего требованиям современной технической эстетики.

По конструкции современные теодолиты можно подразделить на две большие группы в зависимости от вида отсчетного устройства: *теодолиты с оптическим отсчетным устройством* и *электронные теодолиты*.

В соответствии с действующими в России и Беларуси ГОСТами каждому типу теодолитов в зависимости от точности выполняемых ими измерений присваивается определенный шифр, состоящий из буквы «Т» (теодолит) и числа, указывающего допустимую величину СКО измерения угла одним приемом в лабораторных условиях, выводимую по отклонениям от среднего из 12 приемов измерений угла. Например, теодолит Т1 обозначает теодолит 1-секундной точности, Т05- теодолит точности 0,5". Обозначения теодолитов ОТ02 и ОТ02М даны до введения ГОСТов.

Классификация теодолитов по точности представлена в табл. 5.1.

Высокоточные теодолиты предназначены для выполнения угловых измерений в государственных геодезических сетях 1 и 2 классов, а также в специальных геодезических сетях повышенной точности, включая и высокоточные инженерно-геодезические сети.

Общий вид теодолитов Т-05, ДКМ-3, Theo-002 и Т2000S представлен на рис. 5.6 – 5.9.

Классификация теодолитов по точности

№	Тип теодолита	СКО измерения угла одним приемом в лабораторных условиях m_{β}	Наименование теодолитов	Страна-изготовитель
1	Высокоточные	0,5" 1,0" 0,5" $\leq 0,5''$ $\leq 0,5''$	T-05; OT-02; OT-02M; OT1; DKM-3; Theo -002; T2000S	Россия; Россия; Швейцария; Германия; Швейцария
2	Точные	$1'' < m < 10''$	T-2; T-5; 3T2КП; 2T2КП	Россия
3	Технические	$m \geq 10''$	T10; T-15; T-20; T-30	Россия

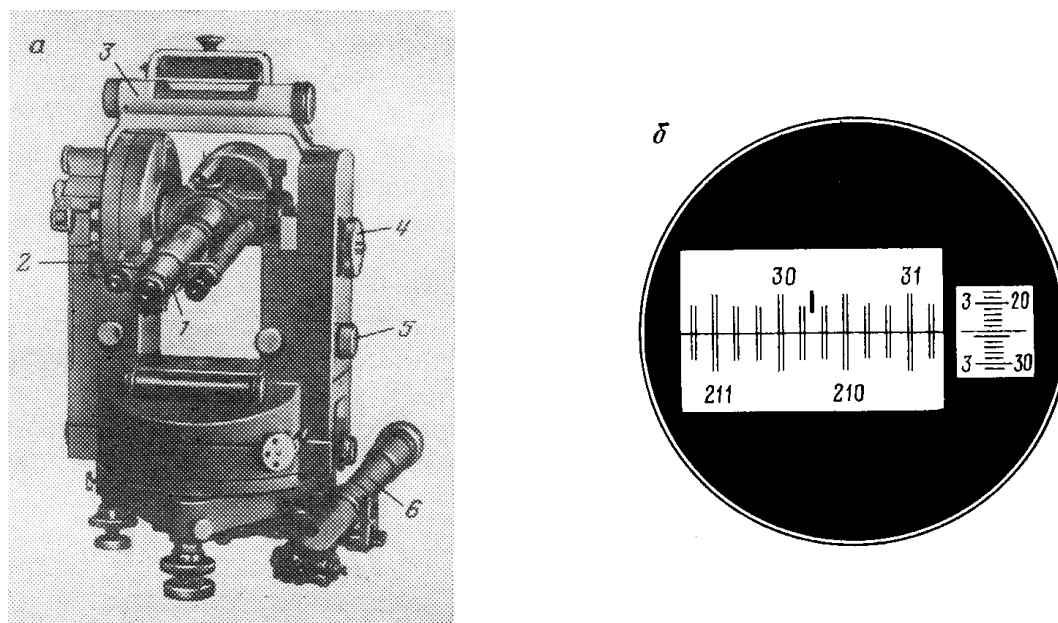


Рис. 5.6. Теодолит T05 (а): 1 – зрительная труба; 2 – окулярный микрометр; 3 – накладной уровень; 4 – головка оптического микрометра; 5 – переключатель изображения горизонтального и вертикального кругов; 6 – поверительная труба с окулярным микрометром; б – поле зрения отсчетного микроскопа

Наибольшее распространение в настоящее время во всем мире получили *электронные теодолиты* и *электронные тахеометры*. Из перечисленных в табл. 5.1 к классу электронных теодолитов относится швейцарский теодолит *T2000S*, в котором вместо традиционной отсчетной системы со стеклянным лимбом и оптическим микрометром используется динамическая система отсчета по кругам с оптико-электронным сканированием, что позволяет автоматизировать процесс угловых измерений и одновременно повысить приборную точность. Теодолит имеет два режима из-

мерения углов: простой и следящий – для наблюдения за движущейся целью. Теодолит снабжен компенсатором, устанавливающим 0-пункт вертикального круга в исходное положение. Точность отсчета по кругам может быть задана по усмотрению наблюдателя: или 1" или 0,1". Теодолит снабжен регистратором, который не только хранит записанную информацию, но и ведет математическую обработку в соответствии с заданной программой. Теодолит позволяет измерить угол с точностью 0,5".

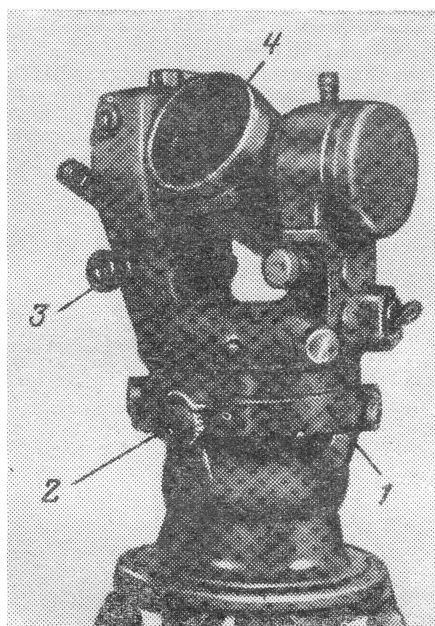


Рис. 5.7. Теодолит DKM3:
1 – подставка с осевой системой;
2 – горизонтирующее устройство; 3 – отсчетный микроскоп; 4 – зрительная труба

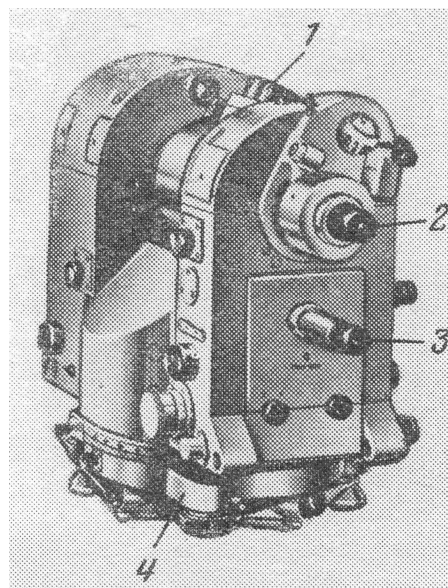


Рис. 5.8. Теодолит Theo 002:
1 – зрительная труба (зеркально-линзовая); 2 – окуляр зрительной трубы; 3 – окуляр отсчетного устройства; 4 – подставка с подъемными винтами

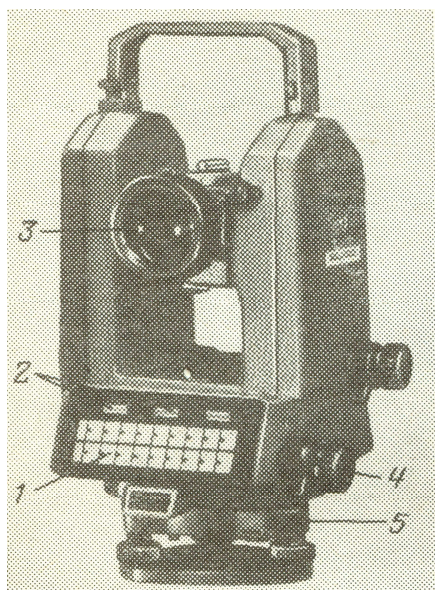


Рис. 5.9. Теодолит T2000S:
1 – дисплейная система управления;
2 – световое табло результатов измерений;
3 – зрительная труба; ; 4 – наводящий и закрепительный винты алидады горизонтального круга; 5 – подставка

5.4. Теория отсчитывания по кругу оптического теодолита

При измерении углов с помощью оптических теодолитов используется принцип совмещенного отсчета. Рассмотрим этот принцип.

Известно, что с целью исключения влияния эксцентриситета отсчеты производят по диаметрально противоположным штрихам лимба и из них выводят среднее. Изобразим это на лимбе (рис. 5.10).

A и B – индексы двух отсчетных приспособлений, установленных на противоположных краях лимба. Обозначим за a и b – младшие штрихи, т.е. ближайшие к отсчетным индексам A и B штрихи лимба. Отсчет M , свободный от эксцентриситета, будет равен

$$M = a + \frac{aA + bB}{2}. \quad (5.1)$$

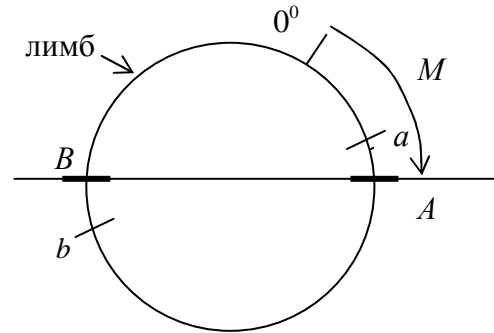


Рис. 5.10. Схема отсчета по лимбу с помощью двух отсчетных приспособлений

В оптических теодолитах отсчетное устройство сделано таким образом, что в поле зрения отсчетного микроскопа видны изображения диаметрально противоположных краев лимба (рис. 5.11).

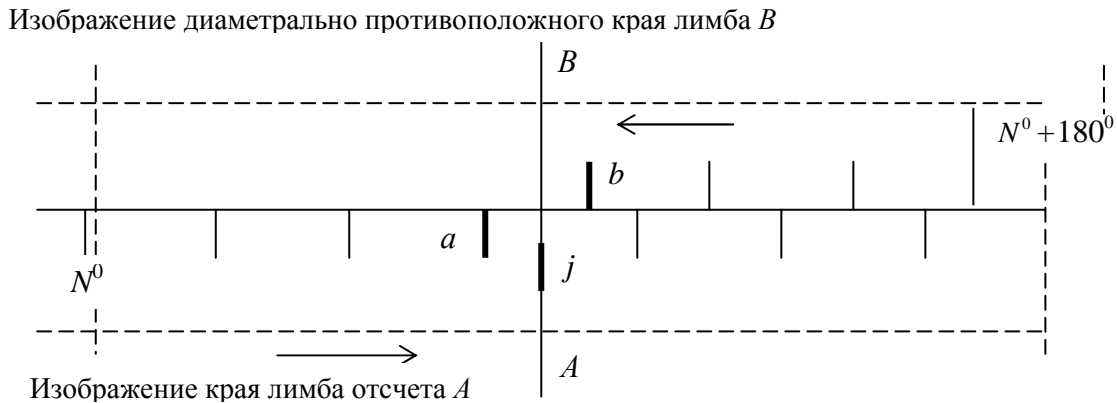


Рис. 5.11. Схема совмещенного отсчета по лимбу оптического теодолита в поле зрения отсчетного микроскопа (j – неподвижный индекс)

Производство отсчетов по лимбу оптического теодолита сводится к измерению расстояния ab между изображениями диаметрально противоположных штрихов a и b и вычислению окончательного отсчета по формуле

$$M = a + \frac{aA + bB}{2} = a + \frac{ab}{2}. \quad (5.2)$$

Отрезок $ab/2$ в оптическом теодолите определяется по оптическому микрометру. Для его определения с помощью барабана оптического микрометра совмещают штрихи a и b и берут отсчет c по оптическому микрометру.

$$\frac{ab}{2} = \mu c, \quad (5.3)$$

где c – отсчет по оптическому микрометру;
 μ – цена деления оптического микрометра.

Отсчет a в формуле (5.2) можно оценить с помощью неподвижного индекса j , совпадающего с точностью до влияния эксцентриситета с линией AB . Следовательно, формула для отсчета M будет выглядеть следующим образом:

$$M = N^0 + i \cdot \bar{n} + c \cdot \mu, \quad (5.4)$$

где i – цена деления лимба;
 \bar{n} – целое число делений лимба от ближайшего младшего градуса до неподвижного индекса.

Однако на практике отсчет в минутах удобнее и надежнее выполнять не по неподвижному индексу, а по числу n целых делений между ближайшими противоположными градусами, т.е. N^0 и $N^0 + 180^0$.

Тогда формула (5.4) в удобном для практического пользования виде запишется как

$$M = N^0 + n \cdot \frac{i}{2} + c \cdot \mu, \quad (5.5)$$

где n – число делений между ближайшим левым от неподвижного индекса градусным штрихом и отличающимся от него на 180^0 .

На основании формулы (5.5) запишем *практическое правило* для взятия отсчета по лимбу в оптических теодолитах:

В окрестности отсчетного индекса совмещают изображения диаметрально противоположных штрихов лимба и фиксируют отсчет N^0 первого слева от неподвижного индекса градусного штриха. Затем определяют число n целых делений между штрихами N^0 и $N^0 + 180^0$. И, наконец, берут отсчет c по шкале секунд микрометра.

В целях повышения точности отсчитывания по лимбу противоположные штрихи совмещают дважды, дважды берут отсчеты, а затем находят среднее из них.

5.5. Контрольные испытания оптических теодолитов

Все теодолиты, направляемые для измерения углов на пунктах геодезических построений, подлежат обязательным поверкам, юстировкам и исследованиям.

В задачу поверок и юстировок входят выявление отступлений от геометрических и оптико-механических требований, положенных в основу конструкции прибора, и наиболее полное устранение этих отклонений.

К числу обязательных поверок, выполняемых перед наблюдениями на каждом пункте, относятся следующие:

1. Ось накладного уровня должна находиться в одной плоскости с горизонтальной осью вращения трубы и должна быть ей параллельна.
2. Вращение алидады вокруг вертикальной оси вращения теодолита должно происходить плавно, без колебаний и заеданий.
3. Горизонтальная ось вращения трубы должна быть перпендикулярна к вертикальной оси вращения теодолита.
4. Наклоны трубы теодолита в вертикальной плоскости, осуществляемые с помощью наводящего винта трубы, не должны вызывать азимутальных смещений оси трубы в лагерах.
5. Отсчетное устройство должно быть выверено и отъюстировано.
6. Коллимационная ошибка трубы должна быть не более $10''$.
7. Нити биссектора окулярного микрометра трубы должны быть установлены вертикально.
8. Место зенита MZ или место нуля $M0$ вертикального круга должно быть не более $10''$. MZ или $M0$ вычисляют по формулам:

- теодолиты ОТ-02М

$$MZ = KL + KP - 180^0; Z = KP - KL + 90^0; \quad (5.6)$$

- теодолиты серии Т2 (3Т2КП, 2Т2КП)

$$MZ = (KL + KP - 360^0)/2; Z = KL - MZ = MZ - KP + 360^0; \quad (5.7)$$

- теодолиты Т05

$$M0 = (KL + KP \pm 180^0)/2; \text{ угол наклона } \alpha = 90^0 - Z; Z = KL - M0; \quad (5.8)$$

9. Подъемные и наводящие винты должны иметь плавный ход без люфта и заеданий.

В задачу исследований входит следующее:

1. Определение неустранимых отклонений инструментальных ошибок с целью введения соответствующих поправок в результаты угловых измерений, уменьшающих влияния этих отклонений.

2. Определение постоянных прибора (цены деления уровня, цены деления окулярных микрометров главной и поверительной труб и т.д.).

3. Определение ошибок делений шкал и винтов измерительных приспособлений.

4. Установление степени влияния внешних условий на работу инструмента.

Совокупность всех исследований в конечном итоге направлена на установление пригодности инструмента для производства угловых измерений данного класса точности.

Исследования выполняются по полной и неполной программам. Перечень необходимых исследований устанавливается инструкцией. По полной программе теодолит исследуют после получения с завода или после капитального ремонта, по неполной – перед выездом на полевые работы и после их окончания.

Результаты исследований заносятся в технический паспорт теодолита, а также в технический отчет по работе того объекта, где применялся теодолит. Заключение о пригодности теодолита к работе выносится на основании результатов исследований отделом технического контроля (ОТК) производственного подразделения.

Перечень исследований высокоточного теодолита по полной программе является следующим:

- а) определение цены деления уровня (накладного и при алидаде);
- б) определение цены деления окулярного микрометра трубы;
- в) исследование правильности хода фокусирующей линзы трубы;
- г) исследование правильности работы микрометра (определение ошибок совмещения штрихов лимба, мертвого хода и рена);
- д) исследование эксцентриситета алидады и лимба;
- е) правильность вращения алидады;
- ж) исследование ошибок диаметров лимба;
- з) систематических ошибок измерения углов, связанных с люфтом подъемных винтов и смещения круга;
- и) определение СКО измерения горизонтального и вертикального угла в лабораторных условиях одним приемом (по отклонениям от среднего из 12 приемов).

Исследования по неполной программе исключают пункты а, б, в, ж, и.

Лекция 6

ОШИБКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕРЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ИХ ВЛИЯНИЯ

6.1. Классификация ошибок угловых измерений

По природе происхождения ошибки угловых измерений подразделяются на три большие группы:

- личные;
- вследствие влияния внешней среды;
- инструментальные.

В каждой из перечисленных групп могут проявляться как случайные, так и систематические ошибки. Все ошибки высокоточных угловых измерений должны быть тщательно изучены, так как знание природы ошибок позволяет свести их влияние к минимуму надлежащей методикой измерений или введением соответствующих поправок. Так, например, влияние случайных ошибок уменьшается путем увеличения числа приемов измерений, которое в силу экономических соображений должно быть минимально необходимым, что становится возможным только при известном характере действия этих ошибок.

Личные ошибки измерений возникают из-за несовершенства измерительной системы: прибор – наблюдатель. К ним можно отнести случайные и систематические ошибки визирования при наведении трубы теодолита на наблюдаемые цели; случайные ошибки совмещения противоположных штрихов лимба при отсчетах по кругам теодолита; систематические ошибки при отсчетах по лимбу из-за различия освещенности штрихов лимба; случайные ошибки отсчитывания по шкале оптического микрометра; ошибки отсчета по шкале накладного уровня, с помощью которого определяют поправки за наклон вертикальной оси прибора.

Заметим, что в электронных теодолитах процесс взятия отсчета автоматизирован, что существенно снижает влияние личных ошибок на результаты угловых измерений.

Инструментальные ошибки угловых измерений возникают вследствие погрешностей изготовления отдельных узлов и деталей теодолитов, влияния остаточных погрешностей его юстировки и регулировки и т.д.

Группа ошибок угловых измерений, возникающая под влиянием внешней среды (т.е. атмосферных, температурных, погодных условий наблюдений) при наблюдении современными теодолитами является основным источником систематических ошибок. Эта группа ошибок является наиболее

сложной для изучения. Из ошибок, возникающих под влиянием внешней среды, следует отметить, прежде всего, явление рефракции.

Обобщая сказанное, отметим, что точные угловые измерения в условиях реальной атмосферы представляют собой довольно сложную проблему. Поэтому каждый высококвалифицированный геодезист должен хорошо понимать источники ошибок угловых измерений и уметь бороться с ними.

6.2. Влияние основных инструментальных погрешностей теодолита на результаты угловых измерений

К главным инструментальным погрешностям теодолита относят ошибки, возникающие из-за несоблюдения конструктивных требований, предъявляемых к взаимному расположению осей прибора, и ошибки диаметров лимба, под которыми следует понимать ошибки нанесения делений на лимб. Разберем влияние этих ошибок.

Нарисуем основные оси теодолита (рис. 6.1).

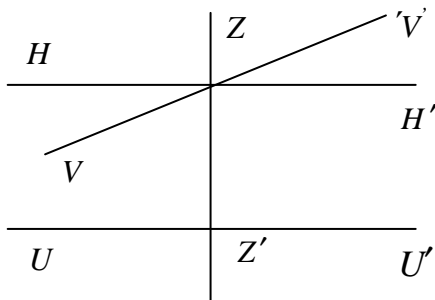


Рис. 6.1. Схема расположения осей теодолита:

UU' – ось уровня; HH' – ось вращения трубы; VV' – визирная ось трубы; ZZ' – ось вращения теодолита, устанавливаемая при работе по направлению отвесной линии в точке наблюдения

Перечислим конструктивные требования, предъявляемые к этим осям:

- 1) VV' должна быть $\perp HH'$ (поверка коллимационной ошибки);
- 2) ZZ' должна быть $\perp HH'$ (поверка равенства подставок);
- 3) ZZ' должна быть $\perp UU'$ (наклон вертикальной оси инструмента или поверка уровня).

При невыполнении этих требований возникают *инструментальные погрешности*, которые каким-то образом влияют на результаты угловых измерений.

Рассмотрим отдельно каждое влияние.

Влияние коллимационной ошибки на отсчет по горизонтальному кругу

Предположим, что в теодолите соблюдены все конструктивные требования, предъявляемые к осям, кроме первого, т.е.

$$\overline{VV'} \wedge \overline{HH'} = 90^0 \pm c,$$

где c – коллимационная ошибка, под которой следует понимать величину отклонения от перпендикулярности взаимного расположения оси вращения трубы и ее визирной оси.

Влияние этой ошибки на отсчет по горизонтальному кругу при наблюдении на некоторую точку M вычисляется по формуле

$$x_c = \frac{c}{\sin Z}, \quad (6.1)$$

где x_c – влияние c на отсчет по горизонтальному кругу;
 Z – зенитное расстояние.

Влияние x_c при $KЛ$ и $KП$ имеет различный знак, т.е. если обозначить через N истинное значение направления, то можно записать

$$\begin{cases} N = KП + \frac{c}{\sin z} \\ N = KЛ \pm 180^0 - \frac{c}{\sin z} \end{cases}. \quad (6.2)$$

Из формулы (6.2) следует, что

$$N = \frac{KЛ + KП \pm 180^0}{2}. \quad (6.3)$$

Среднее из отсчетов, взятых при двух положениях круга, будет свободно от влияния коллимационной ошибки c . Поэтому точные угловые измерения всегда выполняют при двух положениях круга.

Из формулы (6.2) легко выводится формула и методика определения коллимационной ошибки c

$$c = \frac{1}{2} (KЛ - KП \pm 180^0) \cdot \sin z. \quad (6.4)$$

c определяется наведением теодолита при двух положениях круга на предмет, расположенный вблизи горизонта. Принято требовать, чтобы c не превышало 10".

Влияние наклона горизонтальной оси вращения трубы

Предположим, что в теодолите соблюдены все конструктивные условия для расположения осей, кроме 2, т.е. $\overline{ZZ'}$ не \perp $\overline{HH'}$ и

$$\overline{ZZ'} \wedge \overline{HH'} = 90^0 \pm i.$$

Влияние угла i на отсчет по горизонтальному кругу будет, как и в предыдущем случае, иметь различный знак при различных положениях круга, т.е.

$$\begin{cases} N = K\Pi + ictgZ \\ N = KЛ \pm 180^0 - ictgZ \end{cases} \quad (6.5)$$

Из формулы (6.5) следует, что

$$N = \frac{KЛ + K\Pi \pm 180^0}{2}. \quad (6.6)$$

Среднее из отсчетов, взятых при двух положениях круга, будет свободно от влияния наклона i горизонтальной оси вращения трубы.

Влияние наклона вертикальной оси теодолита на отсчет по горизонтальному кругу

Полагаем, что два первых конструктивных требования к расположению осей теодолита выполнены, т.е. нет c и i , но требование 3 не соблюдено, и вертикальная ось вращения теодолита из-за неточности установки наклонена на некоторый малый угол δ относительно направления отвесной линии (рис. 6.2).

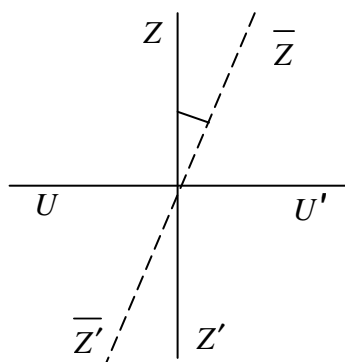


Рис. 6.2. Наклон вертикальной оси теодолита:

ZZ' – направление отвесной линии (истинное положение вертикальной оси теодолита); $\overline{ZZ'}$ – фактическое положение вертикальной оси теодолита; UU' – ось уровня при горизонтальном круге

Влияние δ на отсчет в этом случае определится из выражения

$$x_{\delta} = \delta \cdot ctgZ. \quad (6.7)$$

При наблюдениях одного и того же предмета при двух положениях круга влияние угла δ на отсчет будет одинаково и с одинаковым знаком. Следовательно, влияние δ , т.е. наклон вертикальной оси теодолита или ее неперпендикулярность к оси уровня в среднем из двух отсчетов, взятых при двух положениях круга, не исключаются:

$$N = \frac{KL + KP \pm 180^0}{2} + \delta \text{ctg} Z. \quad (6.8)$$

Поэтому при наблюдениях углов в триангуляции 1 и 2-го классов во все горизонтальные направления, зенитные расстояния которых отличаются от 90^0 на величину более чем на 2^0 , вводится поправка за наклон вертикальной оси инструмента.

Наклон δ определяется с помощью отсчетов по концам пузырька накладного уровня (если он имеется) или уровня при горизонтальном круге

$$\delta = b \frac{\tau}{2}, \quad b = \frac{1}{2} \left[{}_0(L + P) - (L + P)_0 \right], \quad (6.9)$$

где b – наклон горизонтальной оси трубы в полуделениях уровня;
 ${}_0(L + P)$ – сумма отсчетов по левому и правому концам пузырька, когда нуль шкалы уровня находится слева от направления теодолит – визирная цель;

$(L + P)_0$ – нуль справа (при другом положении круга);

$\frac{\tau}{2}$ – цена полуделения уровня.

Окончательная формула вычисления поправки за наклон вертикальной оси теодолита x''_{δ} имеет вид:

$$x''_{\delta} = b \frac{\tau''}{2} \text{ctg} z. \quad (6.10)$$

В зависимости от теодолита величина b в формуле (6.10) может быть вычислена и по отличающемуся от (6.9) выражению, что указывается в инструкции или в паспорте прибора.

Ошибки нанесения делений на лимб. Способы ослабления их влияния

Деления на лимбе наносят с помощью автоматической делительной машины. Вследствие действия ряда причин (например, погрешности установки лимба на ось вращения машины, вибрации машины во время ее работы, изменения температуры и т.д.) эти деления наносятся с некоторыми ошибками.

Обозначим через φ и $(\varphi + 180^0)$ фактические положения двух любых диаметрально противоположных штрихов лимба, а через δ_{φ} и $\delta_{(\varphi+180^0)}$ – ошибки нанесения этих штрихов. При угловых измерениях отсчеты берутся по диаметрально противоположным штрихам лимба, т.е. всегда использу-

ются диаметры лимба, которые характеризуются ошибкой x_ϕ . Величину

$x_\phi = \frac{1}{2}(\delta_\phi + \delta_{(\phi+180^\circ)})$ называют полной ошибкой диаметра ϕ .

Полную ошибку x_ϕ диаметра ϕ представляют в виде суммы систематической x_σ и случайной x_η составляющих, т.е.

$$x_\phi = x_\sigma + x_\eta. \quad (6.11)$$

Полную x_η и систематическую x_σ ошибки диаметров определяют из исследований, а случайную – как разность $x_\eta = x_\phi - x_\sigma$.

Ошибки диаметров подразделяются на длиннопериодические (рис. 6.3), т.е. изменяющиеся по всей окружности лимба, и короткопериодические (рис. 6.4).

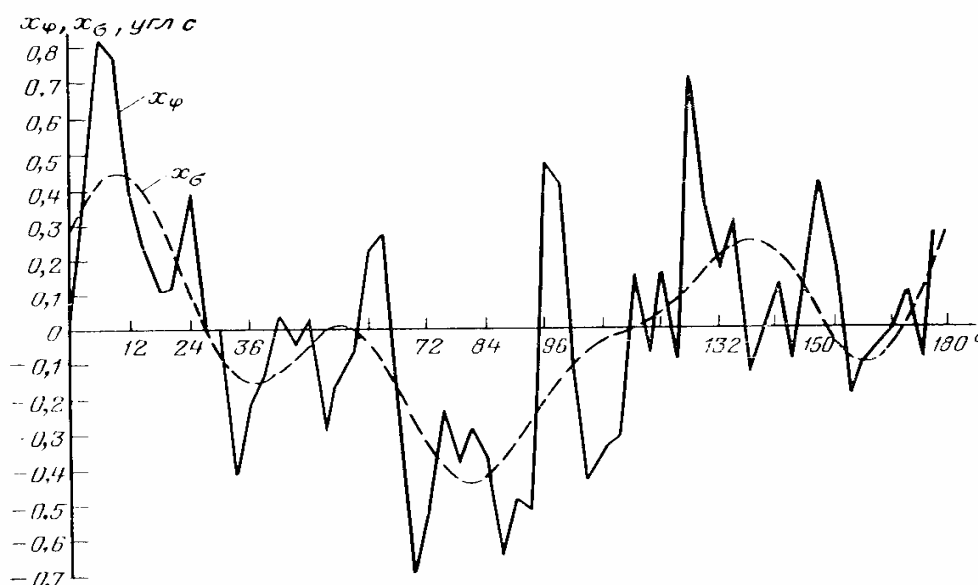


Рис. 6.3. Полные x_ϕ и систематические x_σ длиннопериодические ошибки диаметров лимба теодолита Т05

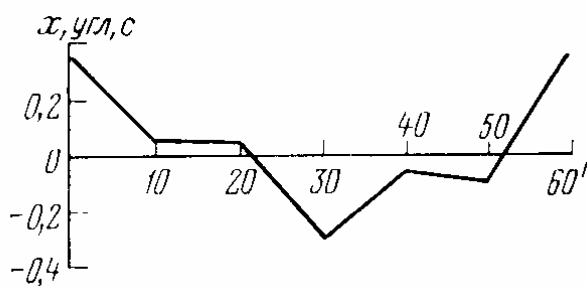


Рис. 6.4. Короткопериодические (внутриградусные) ошибки диаметров лимба теодолита Т05

Допуск на x_{ϕ} у современных теодолитов составляет $\pm(1\div 1,2)''$.

Ошибки диаметров круга непосредственно влияют на точность угловых измерений. Поэтому каждый лимб тщательно исследуют на его пригодность к высокоточным угловым измерениям.

Известны разные способы определения ошибок диаметра лимба: Пранис-Праневича, Елисеева, Литвинова, Шрейбера, Брунса и т.д. В основе всех способов определения ошибок диаметров лимба лежит последовательное измерение по определенной программе трех углов: $\beta_1 = 36^\circ$, $\beta_2 = 45^\circ$, $\beta_3 = 60^\circ$ через интервал $\Delta\phi = 3^\circ$. Обработку выполняют по СНК. Точность определения поправок диаметров характеризуется СКО $\pm 0,1''$.

Способ ослабления влияния ошибок диаметров лимба на результаты угловых измерений основан на квазипериодическом характере их изменения как в пределах всей окружности (длиннопериодические, см. рис. 6.3), так и внутри градуса (короткопериодические, см. рис. 6.4). При выводе среднего арифметического из ошибок диаметров, равномерно распределенных по всей окружности через одинаковые интервалы, происходит их значительная компенсация, причем, в тем большей мере, чем меньше эти интервалы.

Поэтому с целью максимальной компенсации ошибок диаметров круга (длинно- и короткопериодических) в геодезии при измерении углов и направлений всегда переставляют горизонтальный круг теодолита между приемами на величину

$$\delta = \frac{180^\circ}{t} + i \quad \text{или} \quad \delta = \frac{180^\circ}{t} + \frac{i}{2}, \quad (6.12)$$

где t – число приемов;

i – цена наименьшего деления лимба.

Компенсация будет тем полнее, чем больше приемов.

Данный способ перестановки горизонтального круга теодолита между приемами на угол δ позволяет почти полностью скомпенсировать влияние на результаты угловых измерений систематических ошибок, а также существенно ослабить влияние случайных ошибок диаметров. У современных теодолитов ошибка диаметров лимба при 12 приемах измерений обычно не превышает $0,10'' - 0,15''$.

Лекция 7

ВЫСОКОТОЧНЫЕ УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ (начало)

7.1. Общие сведения о производстве высокоточных угловых измерений

На пунктах государственной триангуляции измеряют углы и горизонтальные направления. К методам измерения этих величин предъявляют следующие основные требования:

1. *Программа наблюдений на пункте должна быть оптимальной*, т.е. она должна обеспечивать:

а) равноточность результатов измерений на каждом отдельном пункте, а также на всех пунктах геодезической сети одного класса;

б) необходимую точность результатов при сравнительно небольших экономических затратах на производство работ;

в) строгость и простоту математической обработки результатов измерений на пункте.

2. *Методика наблюдений на пункте должна гарантировать наиболее полное уменьшение влияния различного рода ошибок*, т.е.:

а) максимально исключать влияние главных инструментальных ошибок (коллимационной ошибки, неравенство подставок, наклон вертикальной оси вращения теодолита). Для уменьшения двух первых влияний наблюдения в каждом приеме всегда выполняются при двух кругах: *КЛ* – 1-ый полуприем, *КП* – 2-ой полуприем; для уменьшения последнего влияния при углах наклона более 2° в методике необходимо предусмотреть возможность введения поправки за наклон вертикальной оси вращения теодолита (формула (6.9));

б) максимально исключать влияние ошибок диаметров лимба, для чего согласно формуле (6.11) между приемами следует делать перестановку лимба на величину $\delta = \frac{180}{m} + i$ (или $+\frac{i}{2}$) с целью равномерного использования всех участков лимба;

в) учитывать явление смещения лимба по азимуту в процессе наблюдения;

г) с целью максимального исключения неблагоприятного влияния внешних условий *угловые измерения должны производиться при наилучших условиях видимости*. Как правило, это *период утренней видимости* (начало, в среднем, спустя час после восхода солнца продолжительностью 1,5 – 2 часа); *период вечерней видимости* (начинается примерно за 3 часа до захода солнца и заканчивается за 0,5 – 1 час до захода) и *период ночных наблюдений* (на светящиеся цели). Запрещается выполнять угловые изме-

рения при наличии тумана, дымки, нечетких сильно колеблющихся изображений, ветре. Практики-наблюдатели считают *наилучшими слегка колеблющиеся изображения визирных целей*.

3. *Результаты измерений обязательно должны быть проконтролированы и оценены*. Для этого на каждом пункте выполняются кроме необходимых еще и избыточные измерения.

Классическими способами измерения горизонтальных направлений и углов являются:

- 1) способ круговых приемов (или способ Струве);
- 2) способ всевозможных комбинаций (предложен Гауссом и усовершенствован Шрейбером).

Кроме того, известны еще некоторые видоизменения этих двух способов, которые в литературе тоже идут как самостоятельные, под именем авторов:

- 3) способ Томилина или видоизмененный способ измерения углов всевозможных комбинаций;
- 4) способ Аладжалова или способ неполных приемов.

7.2. Измерение горизонтальных направлений способом круговых приемов

Способ круговых приемов был предложен в 1816 г. в России академиком В.Я. Струве. Он получил широкое распространение во многих странах. В СССР способ круговых приемов применялся при построении триангуляционных сетей, начиная от 2 класса и ниже, в США – при построении триангуляции 1 класса и ниже.

Суть этого способа заключается в следующем.

Пусть мы имеем на пункте триангуляции n направлений (рис. 7.1).

В способе круговых приемов при неподвижном лимбе вращением алидады по ходу часовой стрелки последовательно наводят зрительную трубу на направления $O, A, B, C \dots N$ и снова на начальное направление O (т.е. замыкают горизонт), отсчитывая каждый раз по горизонтальному кругу. Затем переводят трубу через зенит и наблюдают все направления уже в обратном порядке: O, N, \dots, C, B, A, O . Таким образом, каждый прием в данном способе состоит из двух полуприемов, порядок наблюдений в которых следующий:

1-ый полуприем *КЛ*: $O, A, B, C \dots N, O$ (вращение по ходу часовой стрелки) $\beta_0^I, \beta_A^I, \dots, \beta_N^I, \beta_0^{I'}$ (отсчеты при КЛ);

2-ой полуприем *КП*: O, N, \dots, C, B, A, O (вращение против хода часовой стрелки) $\beta_0^{II}, \beta_A^{II}, \dots, \beta_N^{II}, \beta_0^{II'}$ (отсчеты при КП).

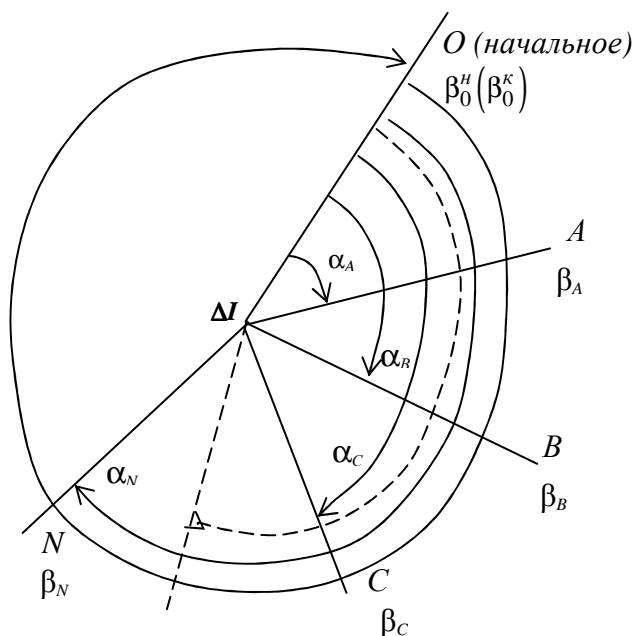


Рис. 7.1. Иллюстрация к способу круговых приемов:

ΔI – пункт наблюдения; $O, A, B, C \dots N$ – наблюдаемые пункты; $\beta_0, \beta_A, \beta_B, \dots, \beta_N$ – отсчеты по горизонтальному кругу на наблюдаемые направления, включая и начальное O ; $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C, \dots, \alpha_N$ – значения горизонтальных направлений относительно начального

За вес P программы измерений в способе круговых приемов, как правило, принимается вес уравненного направления, устанавливаемого формулой

$$P = 2m. \quad (7.1)$$

Вес уравненного угла в этом случае равен

$$P_{ур.у.} = m, \quad (7.2)$$

где m – число приемов.

Число приемов в зависимости от класса рассчитывается по формуле (7.1); P – устанавливается инструкцией.

Класс триангуляции	2	3	4
$P = 2m$	24 – 30	18	12
Число приемов m	12 – 15	9	6

Между приемами всегда выполняется перестановка лимба на величину δ , вычисляемую по формуле (6.12). Необходимая установка лимба в наблюдаемом приеме рассчитывается по формуле

$$\sigma = \left(\frac{180}{m} + i\right)(N-1) \text{ или } \sigma = \left(\frac{180}{m} + \frac{i}{2}\right)(N-1), \quad (7.3)$$

где σ – установка лимба в приеме;

m – число приемов;

i – цена деления лимба;

N – номер приема в программе наблюдений.

Контроли и допуски результатов угловых наблюдений на пункте рассматриваемым способом даны в табл. 7.1.

Основные допуски в способе круговых приемов

Класс триангуляции	2	3
Внутри приема		
Замыкание горизонта	$\Delta_{Л,П,ср.} \leq 5''$	$\leq 6''$
Коллимационная ошибка	$2c \leq 20''$	$\leq 20''$
Колебание коллимации в приеме	$\Delta 2c \leq 8''$	$\leq 10''$
Между приемами		
Расхождение значений направлений между приемами	$\Delta\alpha \leq 5''$	$\Delta\alpha \leq 6''$
Число повторных приема направлений в программе	Не более 30 %	

7.3. Математическая обработка результатов угловых измерений на пункте в способе круговых приемов

Математическая обработка результатов угловых измерений в способе круговых приемов включает:

- обработку полевого журнала;
- составление сводной ведомости результатов угловых наблюдений на пункте с получением урвненных значений направлений и оценкой точности результатов измерений.

Обработка полевого журнала

Непосредственно в полевом журнале для каждого приема вычисляют:

а) коллимационную ошибку на каждое направление (см. рис. 7.1) по формуле

$$2c = \beta^I - \beta^{II} \pm 180^0; \quad (7.4)$$

б) значение каждого направления относительно начального

$$\alpha_i = \frac{\beta_i^I + \beta_i^{II} \pm 180^0}{2} - \beta_0, \quad (7.5)$$

где $\beta_0 = \frac{\beta_0^I + \beta_0^{II}}{2}$, $i - O, A, B, \dots N$ (название наблюдаемого направления).

В значения направлений в каждом приеме вводят поправки:

1) за незамыкание горизонта

$$\delta_k = -\frac{\Delta_{ср.}}{n}(k-1), \quad (7.6)$$

где $\Delta_{cp.}$ – незамыкание горизонта в приеме;
 n – число наблюдаемых на пункте направлений;
 k – порядковый номер наблюдаемого направления в приеме;
 2) за рен (если $r \geq 0,5''$)

$$\delta_r = \frac{2}{i'} c', \quad (7.7)$$

где δ_r – поправка за рен в наблюдаемое направление;
 r – значение рена в секундах;
 i' – цена деления лимба в минутах;
 c' – отсчет по микрометру на наблюдаемое направление в минутах;
 3) за наклон вертикальной оси инструмента (при углах наклона на направление $\geq 2^\circ$):

$$\delta_\alpha = b \frac{\tau}{2} \text{ctg} Z. \quad (7.8)$$

В (7.8) b вычисляют по формуле (6.9).

Составление сводки результатов угловых наблюдений

Пример составления сводки приведен в инструкции и в соответствующей лабораторной работе настоящего УМК. Поэтому поясним только некоторые моменты процесса составления сводок.

Пусть на пункте I отнаблюдено n направлений m приемами по схеме, представленной на рис. 7.1. В результате обработки журнала мы имеем для каждого приема исправленные за все необходимые поправки значения горизонтальных направлений $\alpha_{A_i}, \alpha_{B_i}, \alpha_{C_i} \dots \alpha_{N_i}$ относительно начального направления O , где i – номер приема.

Вероятнейшие значения этих направлений на пункте выводятся из m приемов наблюдений из уравнивания по СНК. Так как согласно условию оптимальности программы наблюдений все измерения одного класса на пункте государственной триангуляции являются равноточными, то уравнивание по СНК в данном случае сводится к выводу средних значений направлений из m приемов (табл. 7.2).

В табл. 7.2:

$$\alpha_{A_{cp.}} = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_{A_i}}{m}; \quad \alpha_{B_{cp.}} = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_{B_i}}{m}; \quad \alpha_{N_{cp.}} = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_{N_i}}{m}. \quad (7.9)$$

Для каждого направления в приеме вычисляется отклонение v значения направления α_i от его среднего значения $\alpha_{cp.}$, выведенного из m приемов,

$$v_i = \alpha_i - \alpha_{cp.} \quad (7.10)$$

Правильность вывода среднего контролируется равенством $\sum v_i = 0$ (для каждого отдельного направления).

Таблица 7.2

Вывод вероятнейших (средних) значений направлений на пункте I
Начальное направление на пункт O

№ приема	Значения направлений в программе							Мах. значения в приеме	
	A	v_A	B	v_B	...	N	v_N	незамыкание Δ	колебание колимации Δ_{2c}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	α_{A_1}	v_{A_1}	α_{B_1}	v_{B_1}		α_{N_1}	v_{N_1}		
2	α_{A_2}	v_{A_2}	α_{B_2}	v_{B_2}		α_{N_2}	v_{N_2}		
...
m	α_{A_m}	$v_{A_{cp.}}$	α_{B_m}	$v_{B_{cp.}}$		α_{N_m}	v_{N_m}		
$\alpha_{cp.}$	$\alpha_{A_{cp.}}$		$\alpha_{B_{cp.}}$...	$\alpha_{N_{cp.}}$			

Оценка точности измеренных и уравненных величин на пункте в СКП

Для оценки точности результатов угловых измерений на пункте определяют СКО направления из одного приема μ и СКО уравненного угла $M_{уг.}$ и СКО уравненного направления M_n из m приемов по формулам:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum vv}{(n-1)(m-1)}} \quad (7.11)$$

На практике μ иногда вычисляют по упрощенной формуле Петерса:

$$\mu = \frac{1,25}{\sqrt{m(m-1)}} \cdot \frac{\sum |v|}{n} = k \frac{\sum |v|}{n}, \quad (7.12)$$

где k в зависимости от числа приемов (6, 9, 12, 15) соответственно равно 0,23; 0,15; 0,11 и 0,08.

$$M_{\text{уг.}} = \frac{\mu}{\sqrt{m}}; M_{\text{н.}} = \frac{\mu}{\sqrt{2m}}. \quad (7.13)$$

Достоинства и недостатки способа круговых приемов

Способ круговых приемов имеет следующие важные *достоинства*:

- 1) простая программа наблюдений, позволяющая получить уравненные направления с одинаковыми весами;
- 2) сравнительно большое число приемов непосредственных измерений каждого направления, что позволяет получить надежные результаты и ослабить влияние систематических ошибок лимба;
- 3) простая математическая обработка;
- 4) высокие технико-экономические показатели.

Недостатки:

1. Требует одновременной хорошей видимости на все направления. Поэтому его применение в горных районах довольно ограничено. В условиях Камчатского региона, например, способ круговых приемов почти не применяется.

2. Сравнительно большая продолжительность приема при числе направлений от 6 и более. (В среднем на наблюдение 1-ого направления тратится примерно 1 минута. Это приводит к заметному увеличению влияния погрешностей, возрастающих пропорционально времени (например, кручение сигнала).

Поэтому в способе круговых приемов в программу наблюдений разрешается включать не больше 7 направлений. При числе направлений на пункте больше 7 программу направлений разбивают на 2 и более группы с обязательным включением в каждую группу общего контрольного угла. Если, например, с пункта *A* необходимо отнаблюдать 9 направлений на пункты 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, то направления можно разбить на следующие 2 группы:

1-ая группа: с пункта *A* на направления 1, 2, 3, 4, 5;

2-ая группа: с пункта *A* на направления 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Необходимость использования такого подхода приводит к увеличению объемов работ на пункте, а также к нарушению требования равноточности.

3. Повышенное требование к жесткости сигнала.

Лекция 8

ВЫСОКОТОЧНЫЕ УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ (продолжение)

8.1. Измерение горизонтальных углов способом всевозможных комбинаций

Способ всевозможных комбинаций (СВК) предложил К. Ф. Гаусс. Позднее он был усовершенствован Шрейбером. Данный способ применяется при измерении углов в триангуляции и полигонометрии 1 и 2 классов, а также в специальных геодезических сетях повышенной точности.

Суть этого способа заключается в следующем (рис. 8.1).

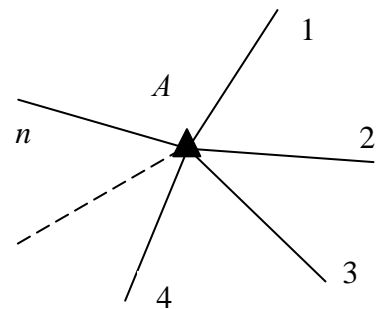


Рис. 8.1. Пояснения к способу всевозможных комбинаций: 1, 2, 3, 4... n – номера наблюдаемых направлений

Пусть на пункте A нам необходимо отнаблюдать n направлений (1, 2, 3, 4 ... n). Согласно рассматриваемому способу мы должны на пункте измерить все возможные комбинации углов, образуемые парными сочетаниями всех направлений.

Наименование направления	Комбинации углов					
A_1	1,2	1,3	1,4	...	$1,n$	(8.1)
A_2		2,3	2,4	...	$2,n$	
A_3			3,4	...	$3,n$	
A_4				$4,4(n-1)$	$4,n$	
.	
$A(n-1)$					$(n-1) \cdot n$	

Число углов r , измеряемых в СВК, можно вычислить по формуле

$$r = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (8.2)$$

Так при $n = 5$ $r = \frac{5 \cdot 4}{2} = 10$ углов, при $n = 4$ $r = \frac{4 \cdot 3}{2} = 6$ углов.

Вес уравненных на станции направлений в способе всевозможных комбинаций вычисляют по формуле

$$P_{нар.} = m \cdot n, \quad (8.3)$$

где n – число направлений;
 m – число приемов.

$$P_{угл.} = \frac{m \cdot n}{2}. \quad (8.4)$$

С целью соблюдения условия равноточности результатов измерений на пунктах одного класса, обеспечения независимости измерений углов и ослабления влияния ошибок диаметров лимба Шрейбер поставил в основу способа два требования:

1. $P_{ур.нар.} = m \cdot n = \text{const}$ (для всех пунктов сети одного класса).

Так в триангуляции 1-ого класса $P = m \cdot n = 35 - 36$, в триангуляции 2 класса $P = 21 - 25$. При наблюдениях со сложных сигналов вес P увеличивается на 25 – 30 %.

2. Каждое направление необходимо измерять при одном и том же положении лимба по возможности только один раз.

Выполнение второго требования достигается двойной перестановкой лимба:

а) перестановкой лимба между приемами на угол δ

$$\delta = \frac{180}{m} + i \text{ или } \frac{i}{2}, \quad (8.5)$$

где m – число приемов;
 i – цена деления лимба.

б) перестановкой лимба при переходе к измерению следующего угла на величину σ

$$\sigma = \frac{(\delta)^0}{n-1} + i \text{ или } \frac{i}{2} \text{ (если } n \text{ – четное)}, \quad (8.6)$$

$$\sigma = \frac{\delta}{n} + i \text{ или } \frac{i}{2} \text{ (если } n \text{ – нечетное)}. \quad (8.7)$$

Рассчитаем таблицу установок лимба для теодолита ОТ-02 для $n = 4$, $P = mn = 24$, $i = 4'$ (табл. 8.1). В этом случае $\delta = \frac{180}{m} + i = \frac{180}{6} + 4' = 30^0 04'$,

$$\text{а } \sigma = \frac{(\delta)^0}{m} + i = \frac{30}{3} + 4' = 10^0 04'.$$

Таблица 8.1

Расчетные установки лимба

 $n = 4, m = 6$

№ приема Назв. угла	1	2	3	4	5	6
1.2	0°00′	30°04′	60°08′	90°12′	120°16′	150°20′
1.3	10°04′	40°08′	70°12′	100°16′	130°20′	160°24′
1.4	20°08′	50°12′	80°16′	110°20′	140°24′	170°28′
2.3	20°08′	50°12′	80°16′	110°20′	140°24′	170°28′
2.4	10°04′	40°08′	70°12′	100°16′	130°20′	160°24′
3.4	0°00′	30°04′	60°08′	90°12′	120°16′	150°20′

Таблица расчетных установок лимба может быть взята готовой из инструкции. Однако на пункте угловые наблюдения выполняют не по расчетным установкам лимба, а по рабочим, которые получают по следующему правилу.

Для углов, связанных с первым (начальным) направлением (1.i), рабочие установки лимба совпадают в точности с теми, что даны в таблице расчетных установок лимба; для углов, не связанных с первым направлением (2.3, 2.4, 3.4 и т.д.), рабочую установку лимба получают прибавлением к расчетной установке угла 1.j, где j – номер левого направления угла. Т.е. при расчете рабочих установок для углов 2.3 и 2.4 прибавляют предварительно измеренный с точностью до минуты угол 1.2; для угла 3.4 – угол 1.3 и т.д.

Согласно сформулированному правилу составим таблицу рабочих установок лимба на основании табл. 8.1, приняв измеренный угол $1.2 = 14^{\circ}08'$, а угол $1.3 = 25^{\circ}12'$ (табл. 8.2).

Таблица 8.2

Рабочие установки лимба

 $n = 4, m = 6$

№ приема Назв. угла	1	2	3	4	5	6
1.2	0°00′	30°04′	60°08′	90°12′	120°16′	150°20′
1.3	10°04′	40°08′	70°12′	100°16′	130°20′	160°24′
1.4	20°08′	50°12′	80°16′	110°20′	140°24′	170°28′
2.3	34°16′	64°20′	94°24′	124°28′	154°32′	184°36′
2.4	24°12′	54°16′	84°20′	114°24′	144°28′	174°32′
3.4	25°12′	55°16′	85°20′	115°24′	145°28′	175°32′

Методика измерения отдельного угла в приеме

Пользуясь таблицей рабочих установок лимба, на горизонтальном круге устанавливают необходимый отсчет. Затем наводят биссектор трубы на левый предмет, т.е. A , и берут отсчет N_A^I . Вращая по ходу часовой стрелки, наводят на правое направление B и берут отсчет N_B^I (первый полуприем).

Далее приступают к выполнению второго полуприема. Для чего переводят трубу через зенит и, вращая алидаду по ходу часовой стрелки, вновь наводят на правый предмет, т.е. B , и берут отсчет N_B^{II} . Затем вращением алидады по ходу часовой стрелки наводят трубу на левый предмет и берут последний отсчет N_A^{II} :

$$N_A^I \rightarrow N_B^I - \boxed{3} - N_B^{II} \rightarrow N_A^{II}. \quad (8.8)$$

Таким образом, в первом полуприеме измеряют угол $A.B$, а во втором – его дополнение до 360° , т.е. $(360^\circ - A.B)$ (рис. 8.2).

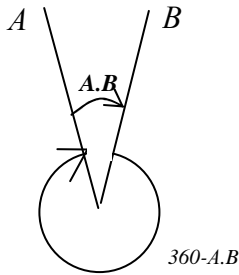


Рис. 8.2. Измерение угла в СВК

Данная программа наблюдений является оптимальной, т.к. она позволяет уменьшить влияния кручения знака и азимутального смещения лимба на результаты угловых измерений, что легко прослеживается из следующих рассуждений.

Обозначим через φ_1 и φ_2 влияние кручения знака соответственно в 1-ом и 2-ом полуприемах, а через l_1 и l_2 – влияние азимутального смещения лимба в 1-ом и 2-ом полуприемах.

Если в схеме (8.8) через N_A^I , N_B^I , N_B^{II} , N_A^{II} принять истинные отсчеты по горизонтальному кругу, то фактические отчеты с учетом влияний рассматриваемых погрешностей по данной методике будут следующие:

Наблюдаемые пункты	Фактические отсчеты по горизонтальному кругу	
	1-ый полуприем	2-ой полуприем
A	N_A^I	$N_A^{II} + \varphi_2 + l_2$
B	$N_B^I + \varphi_1 + l_1$	N_B^{II}
Искомый угол ($A \wedge B$)	$(N_B^I - N_A^I) + \varphi_1 + l_1$	$(N_B^{II} - N_A^{II}) - \varphi_2 - l_2$

$$(A \wedge B)_{cp.} = \frac{1}{2} \left[(N_B^I - N_A^I) + (N_B^{II} - N_A^{II}) \right] + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} + \frac{l_1 - l_2}{2}. \quad (8.9)$$

Так как продолжительность полуприемов примерно одинакова, то $\varphi_1 \approx \varphi_2$ и $l_1 \approx l_2$. Поэтому в (8.9) разности с φ и l при наблюдении по данной методике должны скомпенсироваться или по крайней мере заметно уменьшиться. Следовательно, принятая методика наблюдений углов в способе всевозможных комбинаций является оптимальной.

Полевые контроли в способе всевозможных комбинаций

1. Значения углов, вычисленные в полуприемах (*КЛ* и *КП*) не должны различаться более, чем на 8". (В сущности – это допуск на колебание коллимации в приеме).

2. Расхождения между значениями одного и того же угла в различных приемах не должны превышать: 1 кл. – 4"; 2 кл. – 5".

Если данный допуск не выдержан, то угол перенаблюдается на установках, соответствующих его *min* и *max* значениям. Число перенаблюдённых углов в программе не должно превышать 30 % от общего количества углов.

3. Колебания средних значений одного и того же угла, полученных как по непосредственному его измерению, так и по вычислению в виде суммы или разности двух других углов, не должны превышать 3" при числе направлений $n \leq 5$ и 4" при $n > 5$.

На производстве в связи с этим допуском существует термин «комбинации разлетелись». Если данный допуск не выдержан, т.е. «комбинации разлетелись», программа наблюдений на пункте повторяется заново.

8.2. Уравнивание на станции результатов измерений в способе всевозможных комбинаций

Уравнивание на станции результатов измерений в рассматриваемом способе выполняется по СНК параметрическим методом. В качестве необходимых неизвестных здесь выбираются углы, связанные с начальным направлением (рис. 8.3).

Рис. 8.3. Иллюстрация к уравниванию на станции в СВК:

x_i ($i = 1, 2 \dots n - 1$) – углы, связанные с начальным направлением и выбранные в качестве необходимых неизвестных

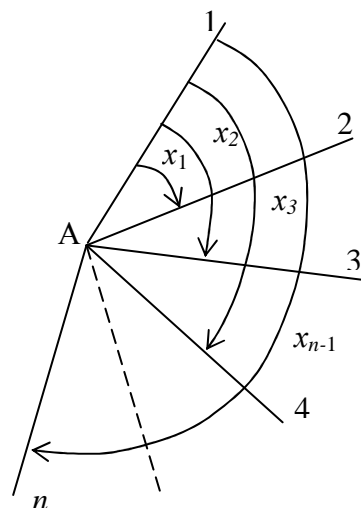


Схема уравнивания по СНК

а. Составление уравнений поправок:

$$\begin{aligned}
 v_{1.2} &= x_1 - 1.2, \\
 v_{1.3} &= x_2 - 1.3, \\
 v_{1.4} &= x_3 - 1.4, \\
 &\dots\dots\dots \\
 v_{1.n} &= x_{n-1} - 1.n, \\
 &\dots\dots\dots \\
 v_{2.3} &= x_2 - x_1 - 2.3, \\
 v_{2.4} &= x_3 - x_2 - 2.4, \\
 &\dots\dots\dots \\
 v_{2.n} &= x_{n-1} - x_1 - 2.n, \\
 &\dots\dots\dots \\
 v_{3.4} &= x_3 - x_2 - 3.4, \\
 &\dots\dots\dots \\
 v_{3.n} &= x_{n-1} - x_2 - 3.n, \\
 &\dots\dots\dots \\
 v_{n-1.n} &= x_{n-1} - x_{n-2} - (n-1).n.
 \end{aligned} \tag{8.10}$$

б. Сведем все уравнения поправок в таблицу:

Углы \ Коэф. при неизв.	<i>a</i> <i>x</i> ₁	<i>b</i> <i>x</i> ₂	<i>c</i> <i>x</i> ₃ <i>x</i> _{<i>n</i>-2}	<i>N</i> <i>x</i> _{<i>n</i>-1}	Свободный член <i>l</i>	Общее кол-во уравнений $\frac{(n-1) \cdot n}{2}$	
1.2	+1					-1.2		}
1.3		+1				-1.3		
1.4			+1			-1.4		
...		
1. <i>n</i>					+1	-1. <i>n</i>		
2.3	-1	+1				-2.3	}	
2.4	-1		+1			-2.4		
...		
2. <i>n</i>	-1				+1	-2. <i>n</i>		
3.4		-1	+1			-3.4	}	
...		
3. <i>n</i>		-1			+1	-3. <i>n</i>		
...		
(<i>n</i> -1) <i>n</i>				-1	+1	-(<i>n</i> -1). <i>n</i> (1)		

в. Составление нормальных уравнений

$$\begin{cases} [aa]x_1 + [ab]x_2 + [ac]x_3 + \dots + [al] = 0 \\ [ab]x_1 + [bb]x_2 + [bc]x_3 + \dots + [bl] = 0 \\ \dots \\ [aN]x_1 + [bN]x_2 + [cN]x_3 + \dots + [Nl] = 0 \end{cases} ,$$

1	$(n-1)x_1 - x_2 - x_3 - \dots - x_{n-2} - x_{n-1} - 1.2 + 2.3 + 2.4 + \dots + 2.n = 0$	(8.11)
2	$-x_1 + (n-1)x_2 - x_3 - \dots - x_{n-2} - x_{n-1} - 1.3 - 2.3 + 3.4 + \dots + 3.n = 0$	
3	$-x_1 - x_2 + (n-1)x_3 - \dots - x_{n-2} - x_{n-1} - 1.4 - 2.4 - 3.4 + 4.5 + \dots + 4.n = 0$	
...	$\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	
$(n-1)$	$-x_1 - x_2 - x_3 - \dots + (n-1)x_{n-2} - x_{n-1} - 1.(n-1) - 2.(n-1) - 3.(n-1) - \dots + (n-1).n = 0$	
Σ	$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{n-2} + x_{n-1} - 1.2 - 1.3 - \dots - 1.n = 0$	

г. Определение неизвестных x_i :

Для определения неизвестных получаем суммарное уравнение Σ , а затем последовательно складываем каждое из входящих в систему (8.11) уравнение с суммарным, получая:

▪ уравнение 1 + Σ

$$n \cdot x_1 = 2 \cdot 1.2 + (1.3 - 2.3) + (1.4 - 2.4) + \dots + (1.n - 2.n).$$

Отсюда

$$x_1 = [1.2]_{ур.} = (2 \cdot 1.2 + (1.3 - 2.3) + (1.4 - 2.4) + \dots + (1.n - 2.n)) / n;$$

▪ уравнение 2 + Σ

$$x_2 = [1.3]_{ур.} = (2 \cdot 1.3 + (1.2 + 2.3) + (1.4 - 3.4) + \dots + (1.n - 3.n)) / n;$$

...

▪ уравнение $(n-1) + \Sigma$

$$x_{n-1} = [1.n]_{ур.} = (2 \cdot 1.n + (1.2 + 2.n) + (1.3 + 3.n) + \dots + (1.(n-1) + (n-1).n)) / n.$$

} (8.12)

В (8.12) через $[1.2]_{ур.}, [1.3]_{ур.}, \dots, [1.n]_{ур.}$ обозначены уравненные значения углов на станции, связанные с начальным направлением.

Из формулы (8.12) следует, что *любой уравненный угол $[1.j]_{ур.}$ определяется как среднее весовое из всех имеющихся углов (измеренного и вычисленных из комбинаций): при этом непосредственно измеренному углу приписывают вес, равный 2, а всем остальным значениям его, найденным из комбинаций соответствующих пар измеренных углов, приписывают вес, равный 1.*

Любой уравненный угол $[k.j]_{yp}$ ($k \neq 1$) определяют из формулы

$$[k.j]_{yp} = [1.j]_{yp} - [1.k]_{yp}. \quad (8.13)$$

Кроме того, любой уравненный угол $[k.j]_{yp}$ можно определить согласно сформулированному правилу для $[1.j]_{yp}$.

Пример: $n = 4$. Измеряемые углы: 1.2 1.3 1.4
2.3 2.4
3.4

$$[1.2]_{yp} = \{ 2[1.2]_{изм.} + (1.3 - 2.3) + (1.4 - 2.4) \} / 4.$$

Оценка точности уравненных величин на станции в СВК

На каждом пункте в способе вычисляют две ошибки:

1. СКО единицы веса (или СКО определения угла из одного приема):

$$m = \sqrt{\frac{2m \sum v v}{(n-1)(n-2)}}, \quad (8.14)$$

где $v = [i.j]_{yp} - [i.j]_{cp}$. (т.е. отклонение уравненного значения угла от его среднего значения, полученного из m приемов; $i = 1, 2, \dots, (n-1)$; $j = 2, 3, \dots, n$);

m – число приемов;

n – число направлений.

2. СКО уравненного угла:

$$m = \frac{\mu}{\sqrt{p}} = \frac{\mu}{\sqrt{mn/2}}. \quad (8.15)$$

Порядок составления сводной ведомости результатов угловых измерений по СВК будет разобран в лабораторной работе № 5.

Достоинства и недостатки способа всевозможных комбинаций

▪ *Достоинства:*

1) возможность представления результатов уравнивания на пункте в виде одного ряда равноточных направлений;

2) возможность измерения углов в любой последовательности, что позволяет выбрать наиболее благоприятные условия наблюдений;

3) малая продолжительность измерения угла в приеме, что заметно (по сравнению с методом круговых приемов) уменьшает влияние кручения знака;

4) Большое число перестановок горизонтального круга, обеспечивающее уменьшение влияния ошибок диаметров лимба на результаты измерений.

▪ *Недостатки:*

- 1) значительное уменьшение числа m приемов с ростом числа n направлений на пункте. Например, при $P = m n = 24$ и $n = 7 - 9$ число приемов в программе m уменьшается до 3, что снижает точность уравненных углов;
- 2) сложная программа наблюдений;
- 3) большой объем полевых и вычислительных работ, особенно заметных с увеличением числа направлений.

8.3. Сравнение трудоемкостей двух классических способов

Способ всевозможных комбинаций является более трудоемким, чем способ круговых приемов. Это легко прослеживается из вычислений, сведенных в табл. 8.3, расчеты в которой выполнены при предположении, что выполняются угловые наблюдения второго класса с весом $P = 24$. За критерий трудоемкости взято число наведений в программе, необходимое для достижения точности наблюдений 2 класса.

Из таблицы следует, что СВК и СКП равны по трудоемкости только при числе направлений $n = 3$. С увеличением числа направлений СВК становится заметно более трудоемким по сравнению со СКП.

Таблица 8.3

Сравнение трудоемкостей двух классических способов

Способ всевозможных комбинаций $P = m n = 24$						
n (число направлений)	3	4	5	6	7	8
m (число приемов)	8	6	5	4	3	3
Число углов в одном приеме = $n(n-1)/2$	3	6	10	15	21	28
Общее число углов в программе = $\frac{n(n-1) \cdot m}{2}$	24	36	50	60	63	84
Число наведений = $n(\text{общее число углов})$	96	144	200	240	252	336
Способ круговых приемов $P = 2m = 24$						
n	3	4	5	6	7	8
m	12	12	12	12	12	12
Число наведений $2(n+1) \cdot m$	96	120	144	168	192	216

Лекция 9

ВЫСОКОТОЧНЫЕ УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ (окончание)

9.1. Способ неполных приемов Аладжалова

Способ неполных приемов применяется при числе направлений $n \geq 7$. Он сочетает в себе два классических способа измерения углов и создан с целью уменьшения недостатков этих способов, имеющих место при большом числе направлений (малое число приемов в СВК, необходимость видимости по всем направлениям в СКП, возрастание влияния кручения сигнала в СКП, значительная трудоемкость СВК и др.).

Программа наблюдений в способе Аладжалова строится следующим образом. Вначале выписываются все углы, которые необходимо измерить в СВК, а затем каждые 3 угла объединяются в группы из 3-х направлений. Разберем это на примере числа направлений $n = 7$ (рис. 9.1).

1. Выписываем измеряемые углы для способа всевозможных комбинаций.

$$\begin{array}{cccccc}
 1.2 & 1.3 & 1.4 & 1.5 & 1.6 & 1.7 \\
 & 2.3 & 2.4 & 2.5 & 2.6 & 2.7 \\
 & & 3.4 & 3.5 & 3.6 & 3.7 \\
 & & & 4.5 & 4.6 & 4.7 \\
 & & & & 5.6 & 5.7 \\
 & & & & & 6.7
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{cccccc} 1.2 & 1.3 & 1.4 & 1.5 & 1.6 & 1.7 \\ & 2.3 & 2.4 & 2.5 & 2.6 & 2.7 \\ & & 3.4 & 3.5 & 3.6 & 3.7 \\ & & & 4.5 & 4.6 & 4.7 \\ & & & & 5.6 & 5.7 \\ & & & & & 6.7 \end{array}} \right\} \text{ В СВК потребуется 252 наведения}$$

2. Образует группы для способа Аладжалова, которые позволили бы вычислить все углы, обозначенные в п. 1.

$$\left. \begin{array}{l}
 1.2.3 \\
 2.4.5 \\
 3.4.6 \\
 3.5.7 \\
 5.6.1 \\
 6.7.2 \\
 4.7.1
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 r = 7 \\
 n = 7 \\
 m_A = 4 \\
 \text{В способе Аладжалова потребуется } (6 \cdot 7 \cdot 4) = 168 \text{ наведений}
 \end{array}$$

Каждая группа измеряется способом круговых приемов без замыкания горизонта m_A приемами.

Число приемов в способе Аладжалова

$$m_A = \frac{3 \cdot m}{2}, \quad (9.1)$$

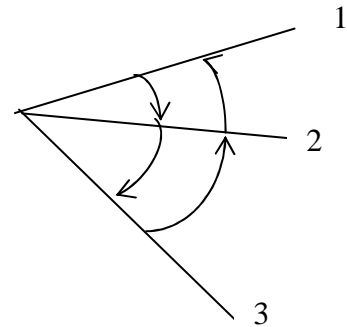
где m – число приемов в способе всевозможных комбинаций.

Для $n = 7$; $m = 3$; $m_A = \frac{3 \cdot 3}{2} = 4$.

Рис. 9.1. Наблюдение отдельной группы в способе Аладжалова:

1-ый полуприем *КЛ*: 1, 2, 3 (по ходу часовой стрелки);

2-ой полуприем *КП*: 3, 2, 1 (против хода часовой стрелки)



В способе неполных приемов аналогично способу всевозможных комбинаций производится двойная перестановка лимба:

а) между приемами на угол

$$\delta = \frac{180}{m_A} + i;$$

б) при переходе от одной группы направлений к другой на угол

$$\sigma = \left(\frac{\delta^0}{r} + i \right),$$

где m_A – число приемов;

r – число групп направлений;

i – цена деления лимба.

Вес уравненных направлений вычисляют по формуле

$$P_{ур.н.} = \frac{2m_A n}{k}, \quad (9.2)$$

где k – число направлений в группе, $k = 3$.

При $k = 3$

$$P_{ур.н.} = \frac{m_A \cdot n}{3}. \quad (9.3)$$

Программа наблюдений по данному способу составляется довольно сложно, т.к. здесь присутствует элемент субъективности. Строго говоря, можно составить несколько программ при различных сочетаниях направлений в группах, что было показано публикациями Ю.А. Аладжалова (1954), Н.В. Ганьшина (1955), Н.В. Яковлева (1959). Поэтому на практике наблюдатель пользуется программами наблюдений и установками, данными в инструкции.

Математическая обработка по способу неполных приемов выполняется аналогично математической обработке по СВК. Предварительно находят средние значения направлений из m_A приемов, а затем из групп наблюдений вычисляют те углы, которые необходимо наблюдать в способе всевозможных комбинаций. Далее обработка с точностью совпадает с обработкой по классическому способу.

Способ неполных приемов по точности не уступает способу всевозможных комбинаций. Однако, он менее трудоемкий, чем СВК, т.к. при наблюдении 7 направлений в нем должно быть выполнено 168 наведений, а в классическом способе – 252 (см. табл. 8.3).

9.2. Способ Томилина или видоизмененный способ всевозможных комбинаций

В этом способе измеряются все углы, образуемые каждой парой смежных направлений и покрывающие горизонт (рис. 9.2), т.е.

$$1.2 \ 2.3 \ 3.4 \ 4.5 \ \dots \ (n-1).n \ n.1,$$

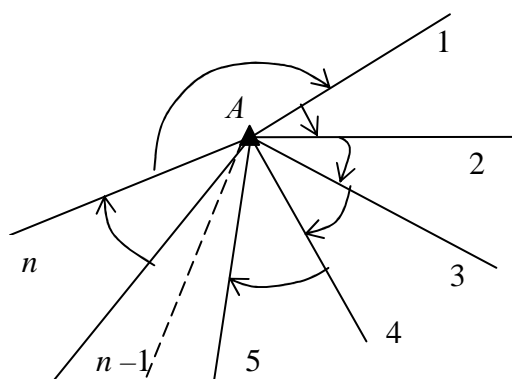


Рис. 9.2. Иллюстрация к способу Томилина

а также углы являющиеся суммой двух смежных углов, т.е.

$$1.3 \ 2.4 \ 3.5 \ \dots \ (n-2).n \ (n-1).1 \ n.2$$

При $n > 5$ в этом способе будет измеряться меньше углов, чем в способе всевозможных комбинаций.

При $n = 5$ в СВК и в способе Томилина наблюдается одинаковое число углов (10 углов).

Углы в СВК: 1.2 1.3 1.4 1.5 2.3 2.4 2.5 3.4 3.5 4.5.

Углы в способе Томилина: 1.2 2.3 3.4 4.5 5.1 1.3 2.4 3.5 4.1 5.2.

При $n = 6, 7$ и т.д. число углов в способе Томилина будет меньше, чем в способе всевозможных комбинаций. Однако заметное уменьшение трудоемкости наблюдается лишь при $n \geq 8$.

При $n > 5$ в рассматриваемом способе измеряются не все углы, получающиеся из n элементов по два, а только часть их. Поэтому процесс получения уравненных направлений на пункте несколько отличается от аналогичного процесса в способе всевозможных комбинаций.

Формулы для вычисления поправок в измеренные углы из уравнивания приведены в Инструкции.

Способ применяется в триангуляции 2 класса при большом числе направлений.

Число приемов в способе Томилина равно 5 или 6 в зависимости от необходимого веса направлений $P = 24$ или 28.

9.3. Меры по ослаблению влияния внешних условий на результаты измерений горизонтальных углов и направлений

В разделе классификация ошибок угловых измерений мы с вами уже касались ошибок, возникающих под влиянием внешних условий. Остановимся сейчас подробнее на этих ошибках, делая акцент на мерах по их ослаблению.

К основным видам ошибок, возникающих под влиянием внешней среды, следует отнести:

- а) ошибки из-за кручения геодезического сигнала;
- б) ошибки за фазы визирных целей;
- в) ошибки из-за влияния изменения температуры воздуха на теодолит;
- г) ошибки вследствие рефракции света.

Физический смысл явления *кручения сигнала* заключается в том, что под действием ветра, солнца, изменения температуры верхняя часть геодезического сигнала, особенно высокого, начинает закручиваться вокруг вертикальной оси. Ясно, что во время наблюдений вместе с сигналом будет смещаться по азимуту и находящийся и на его столике теодолит. Зарегистрированы случаи, когда в процессе угловых измерений кручение сигнала достигает $1''$ за одну минуту, а за один час $25''$. В среднем, влияние кручения сигнала на результаты угловых измерений несколько меньше, но оно все равно существенно. Поэтому при измерении на пункте большого числа направлений круговыми приемами может произойти незамыкание горизонта из-за кручения сигнала.

Кручение геодезических сигналов было обнаружено В.Я. Струве. С целью его учета он предложил снабжать высокоточные теодолиты поверительной трубой. Это предложение было принято и вплоть до настоящего времени наблюдения в триангуляции 1 класса со сложных сигналов выполняются с поверительной трубой. Кроме того, в круговых приемах, как

мы знаем, распределяется невязка за незамыкание горизонта, что по сути является механизмом учета влияния кручения сигнала, т.к. за короткое время кручение сигнала направлено в общем в одну сторону. При измерении отдельных углов ошибки из-за кручения сигнала уменьшают с помощью вращения алидады теодолита в обоих полуприемах в одном направлении. Измерение углов и направлений в приеме должно выполняться как можно быстрее.

Влияние изменения температуры воздуха на теодолит

Все высокоточные теодолиты весьма чувствительны к изменениям температуры. Установлено, что изменение температуры на 1° приводит к изменению положения визирной оси на $0,5 - 1''$, что прямо войдет в ошибку отсчета. Рекомендации по уменьшению влияния температурных изменений на теодолит следующие:

1. До начала наблюдений на пункте теодолит следует выдержать в тени не менее 1 часа, чтобы его температура стала равна температуре воздуха.
2. Запрещается выполнять угловые измерения при скачкообразном изменении температуры на несколько градусов.
3. Во время наблюдений теодолит должен находиться в тени. С этой целью на знаке со стороны солнца организуют подвижную шторку.
4. Отдельный прием измерений должен выполняться максимально быстро.

Ошибки за фазы визирных целей

Как мы знаем, наведение трубы теодолита при высокоточных угловых измерениях производится на визирные цилиндры определенного размера. Практика показала, что из-за неравномерной освещенности цилиндра солнца глаз наблюдателя может неверно оценить положение его геометрической оси и сместить биссектор при наведении трубы теодолита на угол m_{ϕ} в сторону лучше видимой (рис. 9.3).

Этот угол m_{ϕ} называют ошибкой за фазу (однобокое освещение) визирной цели. Ошибки за фазу визирных целей максимальны при гладких цилиндрах. При неблагоприятных стечениях обстоятельств они могут достигать $1 - 1,5''$.

Для уменьшения ошибки за фазу используют визирный цилиндр конструкции Шишкина (см. рис. 5.5), который дает полное затенение его

поверхности (рис. 9.4), благодаря чему ошибка за фазу визирных целей уменьшаются до $0,2 - 0,4''$.

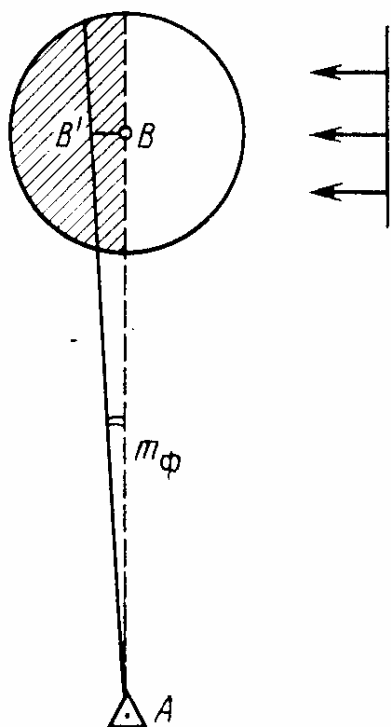


Рис. 9.3. Ошибка за фазу визирной цели

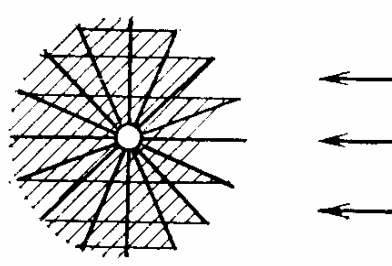


Рис. 9.4. Схема самозатенения визирного цилиндра Шишкина

Однако, несмотря на применение цилиндров конструкции Шишкина, с ошибкой за фазу на практике, все равно, сталкивается каждый наблюдатель. Дело в том, что иногда визирный цилиндр наблюдаемого геодезического знака проектируется не на небо, а на темный фон (лес, сопку), и поэтому плохо виден. Для получения контрастности изображения его маркируют, т.е. обматывают белой материей, а, значит, делают по конструкции практически гладким со всеми вытекающими из этого последствиями опасности внесения ошибки за фазу визирной цели в результаты угловых наблюдений. Наблюдатель должен хорошо понимать это и постараться наблюдать пункт либо в пасмурную погоду, либо в видимость, когда ошибка за фазу будет минимальной.

Боковая рефракция света

Ошибки рефракционного происхождения являются главными ошибками высокоточных угловых измерений. Возникают они вследствие искривления световых лучей, идущих от визирной цели к инструменту через слои воздуха разной плотности.

Поясним это. Так как атмосфера Земли является оптически неоднородной средой, то световой луч проходит от точки *A* к точки *B* не по пря-

мой AB , а по сложной кривой двойкой кривизны оптически кратчайшем путем $A m B$ (рис. 9.5). Наблюдатель, находясь в точке A , видит изображение точки B не по направлению AB , а по касательной AB' к элементу световой кривой в точке A . Угол ρ есть мера рефракции.

Мерой рефракции при угловых измерениях является угол ρ между касательной AB' к лучу в начальной точке его и хордой AB , соединяющей конечные точки луча.

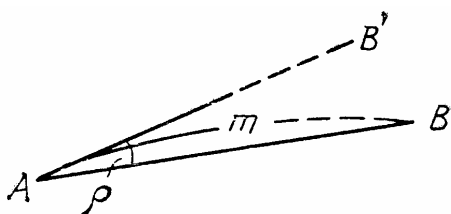


Рис. 9.5. Угол рефракции света

Проекция угла ρ на горизонтальную плоскость определяет угол δ боковой рефракции, а проекция этого же угла ρ на вертикальную плоскость – угол r вертикальной рефракции. Угол r характеризует

влияние рефракции на измеренные зенитные расстояния, угол δ – влияние рефракции на горизонтальные направления и азимуты земных предметов. Углы рефракции не остаются постоянными, что не дает возможности учесть их влияния на результаты измерений.

Вертикальная рефракция может искажать зенитные расстояния до 2' и более. Влияние боковой рефракции только в редких случаях достигает 10".

Существует годовой, сезонный и суточный ходы рефракции. Кроме того, различают большие (областные) и малые (местные) поля рефракции.

Большие поля рефракции обусловлены следующими факторами:

- а) общим распределением плотности воздуха от экватора к полюсу;
- б) распределением плотности воздуха в прибрежных зонах морей и океанов;
- в) распределением плотности воздуха вблизи протяженных горных хребтов.

Влияние боковой рефракции в больших полях в среднем составляет 0,2" и носит систематический характер.

Малые поля рефракции обусловлены местными аномалиями плотности воздуха на пути визирного луча (пересечение долин рек, болот, водной поверхности озер и т.д.). Влияние боковой рефракции на результаты угловых измерений за счет местных полей при неблагоприятных условиях достигает 3" – 7". В среднем эти влияния составляют 0,6" и носят также систематический характер.

К настоящему времени наметились два пути решения проблемы и учета рефракции:

- создание приборов-рефрактометров для непосредственного измерения углов рефракции с требуемой точностью;
- разработка наиболее эффективных методических приемов исключения или существенного ослабления влияний рефракции на результаты измерений.

Имеющиеся сейчас приборы-рефрактометры не могут обеспечить измерения углов рефракции с требуемой точностью. Поэтому при геодезических измерениях, в основном, идут по пути ослабления влияния рефракции методическими приемами. Так для этого при производстве геодезических измерений в сетях 1 и 2 классов действующие инструкции требуют:

1. Измерять горизонтальные направления и углы при хорошей и удовлетворительной видимости на спокойные или слегка колеблющиеся изображения визирных целей.

2. В солнечные дни время, близкое к восходу и заходу солнца, не использовать для высокоточных измерений.

3. Наблюдений на пунктах 1 и 2 классов выполнять как минимум в две видимости, т.е. утром и вечером или в разные дни.

4. Линия направления не должна проходить от ноги сигнала или другого предмета ближе, чем на 20 см.

5. Особенно тщательно следует выбирать начальные направления.

Все перечисленные меры по ослаблению влияния внешних условий позволяют измерить угол со СКО $0,6'' - 0,8''$. Для государственных сетей эта точность достаточна. Однако при создании специальных геодезических сетей, например на геодинамических полигонах, требуется уже более высокая точность угловых измерений. Поэтому, поскольку приборы для непосредственного измерения углов рефракции еще не созданы, необходимо развивать и совершенствовать методики ослабления влияния рефракции на результаты геодезических измерений.

Лекция 10
ЭЛЕМЕНТЫ ПРИВЕДЕНИЯ.
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТ НА ПУНКТЕ ТРИАНГУЛЯЦИИ

10.1. Понятие элементов приведения.
Вычисление поправок за элементы приведения

При выполнении наблюдений с сигналов теодолит устанавливается на наблюдательный столик верхней площадки сигнала и наводится на визирные цилиндры соседних знаков. Кроме того, каждый геодезический сигнал (знак) имеет свой центр, закопанный в земле. В общем случае центр вращения теодолита J , центр визирного цилиндра V и центр знака O в плане не совпадают между собой (рис. 10.1).

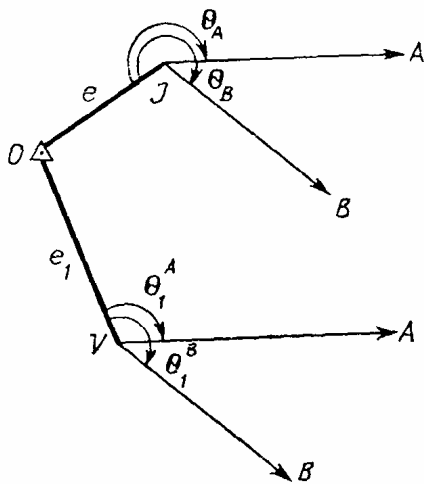


Рис. 10.1. Элементы приведения на пункте триангуляции:

$OJ = e$ – линейный элемент центрировки; θ – угловой элемент центрировки; $OV = e_1$ – линейный элемент редукции; θ_1 – угловой элемент редукции

Поэтому возникает задача согласования результатов угловых наблюдений, т.е. приведения их к центрам знаков. Для чего в каждое наблюдаемое на знаке направление должны быть введены две поправки:

- а) поправка за несовпадение центра вращения теодолита с центром знака или поправка за центрировку (c'');
- б) поправка за несовпадение наблюдаемого визирного цилиндра с центром наблюдаемого же знака (r'').

Поясним эти поправки. Пусть на пункте с центром в точке O выполняются угловые измерения. Теодолит находится в точке J , визирный цилиндр в точке V (рис. 10.2). Из точки J проведем направление $JA = 0^0$ на начальный пункт A и направление JB на какой-либо другой пункт B ; из точки V – направления VA и VB на те же пункты. Обозначим через M измеренные направления на пункте, отсчитываемые от начального. Проведем из точки O направление OB' параллельно направлению JB . Угол $c'' = \angle B'OB$ равен поправке за центрировку теодолита в измеренное на-

правление JB , введя которую получаем искомое направление OB между центрами пунктов O и B .

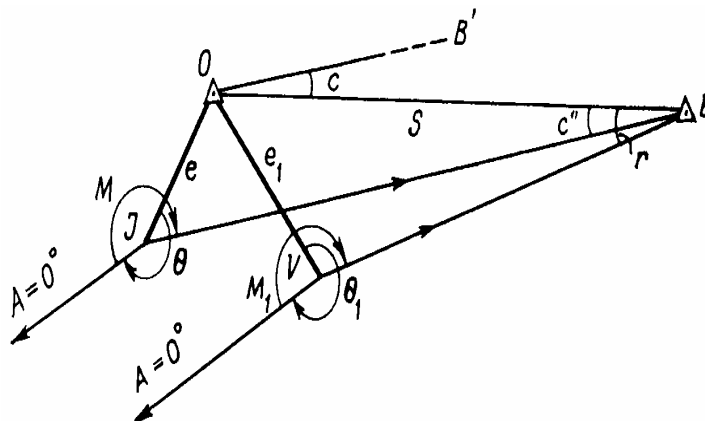


Рис. 10.2. Поправка в направление за центрировку теодолита и редукцию визирной цели

Решив треугольник JOB , в котором S равна длине стороны между пунктами O и B , а $\angle OJB = (M + \theta - 360^\circ)$, запишем

$$\frac{e}{S} = \frac{\sin c}{[\sin(M + \theta - 360^\circ)]}. \quad (10.1)$$

Ввиду малости c формулу для вычисления поправки в направление за центрировку теодолита из (10.1) можно записать в виде

$$c'' = \frac{\rho'' \cdot e}{S} \sin(M + \theta). \quad (10.2)$$

Поскольку визирная цель V находится не над центром пункта O , измеренное на пункте B направление BV следует исправить поправкой $r = \angle OBV$ за редукцию визирной цели, чтобы получить направление BO . Решив треугольник OBV , в котором за S обозначена длина стороны между пунктами O и B , а $\angle OVB = (M_1 + \theta_1 - 360^\circ)$, найдем малый угол r

$$r'' = \frac{\rho'' \cdot e_1}{S} \sin(M_1 + \theta_1). \quad (10.3)$$

В (10.2) и (10.3) e и θ – соответственно, линейный и угловой элементы центрировки на пункте O ; e_1 и θ_1 – линейный и угловой элементы редукции на пункте O ;

$$\rho'' = 206\,265;$$

S – расстояние от пункта наблюдения до наблюдаемого пункта;

M – значение измеренного направления на пункт, для которого вычисляются поправки (достаточно знать до минут).

Следует отметить, что поправки за центрировку теодолита вводят в направления, измеренные на пункте O , а поправки за редукцию визирной цели со своим знаком – в обратные направления AV , BV и т.д., поскольку визирование с пунктов A , B и т.д. производится не на центр пункта O , а на визирную цель V , не совпадающую с ним.

Линейные и угловые элементы центрировки и редукции на пункте можно определить двумя способами: графическим и аналитическим.

10.2. Графический способ определения элементов приведения

Графический способ определения элементов приведения очень прост и заключается в проецировании всех центров (центра визирного цилиндра, центра вращения теодолита, центра знака) на специальный центрировочный лист. С этой целью над центром знака устанавливают столик, на горизонтальную поверхность которого прикрепляют центрировочный лист, на котором показано направление N-S.

Затем с помощью вспомогательного теодолита, установленного на расстоянии не менее 1,5 высоты сигнала, проецируют на этот лист центр визирного цилиндра V , ось вращения теодолита J и центр знака O . Проецирование выполняют с трех установок теодолита при $KЛ$ и $KП$, размещенных по азимуту на 120^0 . От пересечения прямых, проведенных с каждой постановки теодолита, образуются треугольники погрешностей, стороны которых не должны превышать 3 мм при проецировании центра знака, 5 мм – при проецировании оси теодолита, 10 мм – при проецировании центра визирного цилиндра.

При соблюдении этих допусков искомые точки (O – центр знака, J – ось вращения теодолита, V – центр цилиндра) должны находиться в центре соответствующих треугольников погрешностей.

Далее с точек J и V центрировочного листа (см. рис. 10.1), не сдвигая его, проводят с помощью визирной линейки направления на два наблюдаемых пункта (обычно один из них начальный) A и B . Если эти направления с земли не видны, то на них заранее должны быть выставлены вешки.

Затем с помощью линейки измеряют с точностью до 1 мм линейный элемент центрировки ($e = OJ$) и линейный элемент редукции ($e_1 = OV$). Затем с точек J и V большим транспортиром измеряют с точностью до $15'$ углы $\theta_A, \theta_B, \theta_1^A, \theta_1^B$, из которых выводят угловой элемент центрировки θ и угловой элемент редукции θ_1 .

Углы θ и θ_1 отсчитываются от направления на центр O соответственно с J и V до начального направления по ходу часовой стрелки.

Кроме того, транспортиром измеряют на центрировочном листе угол между направлениями A и B и сравнивают его с измеренным теодолитом в программе наблюдений. Расхождение углов не должно превышать 1° .

Если линейные элементы приведения велики (> 30 см), их определяют аналитическим способом.

10.3. Последовательность работ на пункте триангуляции

Дадим последовательный перечень работ на пункте триангуляции:

1. Вскрываются центры знака и ориентирных пунктов (ОРП). При необходимости центры ОРП выносят на вспомогательный столик с помощью отвеса или теодолита.

2. Поднимают теодолит на пункт, проверяют устойчивость столика для инструмента и отсутствие касания внутренней пирамиды с полом для наблюдателя и лестницами. При обнаружении недостатков наблюдатель обязан устранить их.

3. Разыскиваются все знаки, подлежащие наблюдениям с данного пункта, и записываются с точностью до минуты отсчеты горизонтального и вертикального кругов на каждый знак; проверяют и в случае надобности всегда принимают меры к тому, чтобы луч визирования не проходил ближе 20 см от ноги сигнала.

4. Составляют программу наблюдений.

5. Определяют элементы приведения (дважды: до начала наблюдений на пункте и после их окончания).

6. Определяют высоту знака (обычно путем непосредственного измерения с помощью рулетки; если это сделать невозможно, то аналитическим способом). Для последующих обработки необходимо знать две высоты:

а) центр знака – верх визирного цилиндра h_V ;

б) центр знака – ось вращения зрительной трубы теодолита h_J .

7. Измеряют расстояния до ОРП с точностью ± 1 м.

8. Выполняют измерение зенитных расстояний, горизонтальных углов или направлений на пункте.

9. Выполняют угловую привязку ОРП способом круговых приемов. Ориентирные пункты наблюдают с двумя любыми направлениями сети, тремя приемами и теми же инструментами, что и углы сети. Расхождения направлений между приемами не более $6''$.

10. Контрольные вычисления.

11. После окончания всех работ на пункте закапывают центры знака и ОРП и восстанавливают их наружное оформление.

Контрольные вычисления на пункте включают:

- а) проверку и оформление журналов измерения направлений и зенитных расстояний;
- б) проверку и оформление центрировочных листов;
- в) вычисление высот знаков и расстояний до ОРП, если они определялись аналитически;
- г) составление сводок угловых наблюдений.

10.4. Предварительные вычисления при обработке линейно-угловых плановых сетей

Целью предварительных вычислений является получение измеренных величин, приведенных к центрам пунктов и редуцированных на плоскость в проекции Гаусса, а также контроль и оценка качества результатов выполненных измерений. В итоге предварительной обработки осуществляется подготовка качественных измерений к уравниванию.

Содержание и последовательность предварительных вычислений

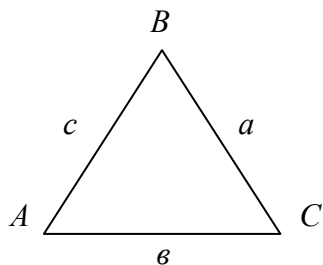
Предварительные вычисления включают:

- 1) проверку полевых материалов;
- 2) составление сводок результатов измерений;
- 3) составление рабочей схемы плановой сети (как правило, переносится с карты);
- 4) предварительное решение треугольников триангуляции и вычисление их сферических избытков;
- 5) приведение результатов измерений к центрам знаков;
- 6) вычисление приближенных координат пунктов;
- 7) составление карточек предварительной обработки на каждый пункт (согласно указаниям инструкции);
- 8) редуцированные вычисления;
- 9) составление таблицы направлений, приведенных к центрам знаков и редуцированных на плоскость в проекции Гаусса – Крюгера;
- 10) анализ полученных результатов;
- 11) обработка материалов тригонометрического нивелирования и вычисление высот пунктов.

Разберем несколько подробнее некоторые из перечисленных пунктов.

Предварительное решение треугольников выполняют с целью получения длин сторон, необходимых для вычисления поправок за центрировку и редукцию, а также для вычисления сферических избытков.

Треугольники решают по теореме синусов.



$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}. \quad (10.4)$$

Если a – исходная сторона, а A, B, C – измеренные углы, то

$$\begin{aligned} b &= a \cdot \sin B; \\ c &= a \cdot \sin C. \end{aligned} \quad (10.5)$$

Одновременно вычисляют сферические избытки треугольников по одной из формул:

$$\varepsilon'' = fab \cdot \sin C = fac \cdot \sin B = fbc \cdot \sin A, \quad (10.6)$$

$$f = \frac{\rho''}{2R^2}.$$

f выбирается из геодезических таблиц по аргументу X_m .

Приведение результатов измерений к центрам знаков или вычисление поправок за центрировку и редукцию

Поправки за центрировку и редукцию *угловых измерений* вычисляют по формулам

$$c'' = \frac{\rho'' \cdot e}{S} \sin(M + \theta),$$

$$r'' = \frac{\rho'' \cdot e_1}{S} \sin(M_1 + \theta_1).$$

Обозначения – см. в (10.2) и (10.3).

Для *линейных измерений* – по формулам

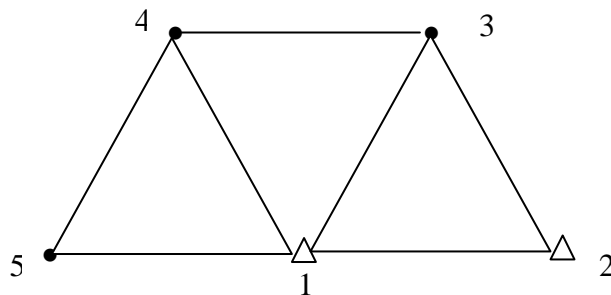
$$c_{(M)} = -l \cdot \cos \theta;$$

$$r_{(M)} = -l_1 \cdot \cos \theta_1. \quad (10.7)$$

В (10.7) c и r – поправки за центрировку и редукцию измеренной линии.

Вычисление приближенных координат пунктов на этапе предварительной обработки необходимо для определения поправок в направления за кривизну изображения геодезической линии на плоскости, а также для уравнивания. При вычислении координат чаще всего применяют формулы котангенсов (10.8) (рис. 10.3).

Рис. 10.3. Иллюстрации к применению формул котангенсов для определения приближенных координат пунктов сети триангуляции



В $\Delta 123$ x_1, y_1, x_2, y_2 – исходные координаты, x_3, y_3 – ?

$$x_3 = \frac{x_1 \cdot \text{ctg}2 + x_2 \cdot \text{ctg}1 + y_2 - y_1}{\text{ctg}1 + \text{ctg}2}, \quad (10.8)$$

$$y_3 = \frac{y_1 \cdot \text{ctg}2 + y_2 \cdot \text{ctg}1 + x_1 - x_2}{\text{ctg}1 + \text{ctg}2}.$$

В формулах (10.8) 1, 2 – углы, в которые уже введены поправки за элементы приведения. Приближенные координаты пунктов должны быть известны с точностью не ниже 2 м.

Редукционные вычисления. Математическая обработка результатов геодезических измерений выполняется на плоскости проекции Гаусса – Крюгера. Перенесение или редуцирование этих результатов с земной поверхности на плоскость выполняется в два этапа. На первом этапе результаты геодезических измерений редуцируются на поверхность референц-эллипсоида. На втором – редуцируются на плоскость.

При редуцировании в измеренные направления вычисляются следующие поправки:

а. Поправка δ_1 за уклонения отвесных линий

$$\delta_1'' = -(\xi_i \sin A_{in} - \eta_i \cos A_{in}) \cdot \text{ctg}Z_{in}, \quad (10.9)$$

где in – название измеренного направления;

ξ_i, η_i – составляющие уклонения отвеса на наблюдаемом пункте;

A_{in}, Z_{in} – азимут и зенитное расстояние измеренного направления.

Поправка δ_1 учитывается при создании высокоточных геодезических сетей в горных районах.

б. Поправка δ_2 в направление за высоту наблюдаемой цели над референц-эллипсоидом (учитывается при высокоточных геодезических измерениях в горных и высокогорных районах).

в. Поправка δ_3 за переход от нормального сечения к геодезической линии (вводится только в триангуляции 1 класса).

г. Поправки δ_{in} и δ_{ni} – в направления за кривизну изображения геодезических линий в проекции Гаусса – Крюгера. Эта поправка вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned}\delta_{in} &= \frac{1}{3} f (x_i - x_n) (2y_i + y_n); \\ \delta_{ni} &= -\frac{1}{3} f (x_i - x_n) (2y_n + y_i),\end{aligned}\quad (10.10)$$

где δ_{in} и δ_{ni} – поправки в прямое и обратное направления;

x_i, y_i, x_n, y_n – приближенные значения координат пунктов i и n , км;

$f = \frac{\rho''}{2R^2}$ и выбирается из геодезических таблиц по $x_m = \frac{x_i + x_n}{2}$.

Поправка δ вводится в измеренные направления триангуляции 1, 2, 3 и 4 классов.

Лекция 11

ВЫСОКОТОЧНОЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ И НАЗНАЧЕНИЕ НИВЕЛИРНЫХ СЕТЕЙ. ПОНЯТИЕ О СИСТЕМАХ ВЫСОТ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ГЕОДЕЗИИ. НИВЕЛИРНЫЕ ЗНАКИ

В предыдущих лекциях мы рассмотрели методы построения плановых государственных геодезических сетей, развиваемых с целью нахождения координат (x , y) центров пунктов. Однако для определения местоположения точки земной поверхности в пространстве необходима еще третья координата H , обозначающая ее положение по высоте в некоторой высотной системе координат. Эта высотная координатная система задается в каждом государстве относительно некоторой исходной уровенной поверхности и распространяется на его территории методом высокоточного геометрического нивелирования, которому мы посвятим оставшиеся лекции по первому разделу высшей геодезии.

11.1. Общие сведения о нивелирных сетях.

Классификация и назначение нивелирных сетей.

Государственная нивелирная сеть

Нивелирные сети подразделяются:

- 1) на государственную нивелирную сеть.
- 2) на нивелирную сеть сгущения.
- 3) на нивелирную съемочную сеть.
- 4) на высокоточную нивелирную сеть специального назначения.

Государственная нивелирная сеть (ГНС) является высотной основой топографических съемок всех масштабов и всех геодезических измерений, проводимых для удовлетворения потребностей народного хозяйства, обороны страны, для решения научных и практических задач. Она развивается по принципу перехода от общего к частному и разделяется на нивелирные сети I, II, III и IV классов.

Нивелирная сеть I и II классов является главной высотной основой страны, которая создается по специально разработанным программам и схемам, предусматривающим выполнение высокоточных нивелирных работ на многие годы вперед. Основным назначением главной высотной основы страны является распространение единой системы высот на территорию всего государства. Кроме того, при помощи нивелирования I и II классов решают следующие научные задачи:

- а) изучение фигуры и гравитационного поля Земли;
- б) изучение современных вертикальных движений земной коры;
- в) определение разностей уровней морей и океанов;

г) сейсмическое районирование территории страны, выявление предвестников землетрясений;

д) прогнозирование влияния производства на окружающую среду, особенно при добыче нефти, газа и других полезных ископаемых.

Нивелирные сети III и IV классов предназначены для обеспечения топографических съемок вплоть до масштаба 1:5 000 и решения различных инженерно-геодезических задач.

Нивелирные сети сгущения служат высотной основой топографических съемок крупных масштабов (1:5 000 – 1:500), а также инженерно-геодезических работ. В зависимости от площади снимаемой территории и требуемой точности нивелирные сети сгущения развиваются в виде нивелирных полигонов и ходов III и IV классов или технического нивелирования.

Высотная съемочная сеть является непосредственным высотным обоснованием топографических съемок всех масштабов и инженерно-геодезических работ. Она создается путем проложения между пунктами государственной нивелирной сети и сетей сгущения ходов технического или тригонометрического нивелирования.

Высокоточные нивелирные сети специального назначения создаются для различных специальных целей: на геодинамических полигонах для наблюдения за вертикальными деформациями земной поверхности; на промышленных и строительных площадках для монтажа оборудования или для наблюдения за осадками инженерно-технических сооружений и т.д. На каждом конкретном объекте такая нивелирная сеть создается по специальной программе. Специальные нивелирные сети могут создаваться в местной системе координат, но обязательно иметь высотную привязку к реперам государственной нивелирной сети.

Схема построения государственной нивелирной сети

Нивелирная сеть строится по принципу перехода от общего к частному, согласно которому вначале создается нивелирная сеть I класса, которая последовательно сгущается сетями II, III и IV классов.

Сеть I класса состоит из ходов, образующих замкнутые полигоны периметром около 3 000 – 4 000 км, или отдельных линий большой протяженности. Направление и протяженность этих линий обычно рассматривается и утверждается в специальных проектах Комитета по геодезии.

Нивелирная сеть II класса опирается на нивелирные линии I класса и создается в виде замкнутых полигонов. Периметры этих полигонов в обжитых районах составляют (400 – 800) км, в необжитых – (1 000 – 2 000) км.

Линии нивелирования I и II классов прокладывают, в основном, по железным, шоссейным и улучшенным грунтовым дорогам. При отсутствии дорог – по берегам больших рек, морей, тропам, зимникам.

Нивелирные сети III и IV классов развивают внутри полигонов высшего класса. Периметры нивелирных полигонов III класса в обжитых районах не превышают 150 км, в необжитых – 300 км. Периметры полигонов и длины отдельных линий IV класса не превышают 50 км.

Линии нивелирования всех классов на местности закрепляются постоянными знаками (реперами, скальными или стенными марками) не реже, чем через 5 км по трассе, в труднодоступных районах – не реже 6 – 7 км.

В сетях I, II и III классов нивелирование прокладывают в прямом и обратном направлениях. Нивелирные ходы IV класса прокладывают только в одном направлении.

Вдоль всех нивелирных линий I и II классов, а в горных районах и вдоль линий III класса, по специальной программе выполняют гравиметрические измерения, что необходимо для вычисления поправок в измеренные превышения за переход к разностям нормальных высот.

Требования и допуски, соблюдаемые при производстве нивелирных работ в государственной сети, представлены в табл. 11.1.

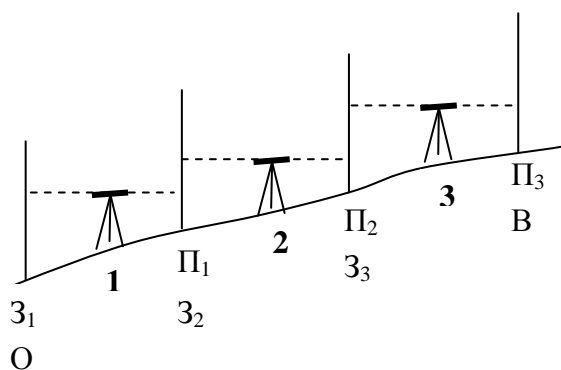
Таблица 11.1

Технические требования к производству государственного нивелирования

Класс	Периметр полигона (км), ср.	Основные допуски					СКО, мм/км	
		Допустимая невязка, мм	Длина плеча (м)	Неравенство плеч (м)	Накопление разностей плеч по секции (м)	Высота визирного луча, не менее (м)	Случайная η	Систематическая σ
I	3 000 – 4 000	$3\sqrt{L(\text{км})}$	50	0,5	1,0	0,8	0,5	0,05
II	500 – 600	$5\sqrt{L(\text{км})}$	65	1,0	2,0	0,5	1,2	0,2
III	150 – 200	$10\sqrt{L(\text{км})}$	75	2,0	5,0	0,3	5,0	–
IV	50	$20\sqrt{L(\text{км})}$	100	5,0	10,0	0,2	10,0	–

11.2. Понятие о системах высот применяемых в геодезии

Для точного определения разностей высот точек земной поверхности применяется метод геометрического нивелирования. Данный метод основан на использовании горизонтального луча визирования (рис. 11.1).



$$h_1 = 3_1 - П_1$$

$$h_2 = 3_2 - П_2$$

$$h_3 = 3_3 - П_3$$

$$H_B = H_O + \sum_{i=1}^3 h_i$$

Рис. 11.1. Схема геометрического нивелирования:

OB – нивелирная секция; 1, 2, 3 – номера станции (точки стояния нивелира); 3, П – отсчеты по задней и передней рейкам на каждой станции; h – превышение на станции; H_O, H_B – отметки реперов O и B

Очень простая идея геометрического нивелирования осложняется следующим обстоятельством. Дело в том, что положение горизонтального луча визирования (т.е. луча, направленного по касательной к уровенной поверхности в точке наблюдения) определяется при помощи уровня нивелира, который фиксирует этот луч по направлению перпендикуляра к отвесной линии в данной точке.

Отвесные линии в точках 1, 2, 3 стояния нивелира, а также в точках стояния реек, т.к. рейки тоже с помощью уровней устанавливаются по направлениям отвесных линий, не параллельны между собой. Следовательно, будут не параллельны между собой и проходящие через данные точки перпендикулярные к отвесным линиям уровенные поверхности (рис. 11.2).

Превышение точки B над O обозначим через $h_{изм}$. Из чертежа видно, что $h_{изм} = \sum \Delta h_i$, т.е. расстоянию между уровенными поверхностями, проходящими через точку O и точку B, когда путь нивелирования совпадает с профилем OB.

Если изменим путь нивелирования и пойдем через точку A, т.е. по пути OAB, то в результате получим измеренное превышение $h'_{изм} = OA$, т.к. AB – уровенная поверхность, т.е. поверхность одинакового потенциала, между любыми точками которой превышение равно 0.

Если путь нивелирования будет проходить через точку C (OCB), то получим уже третье значение измеренного превышения $h''_{изм} = CB$.

Поскольку уровенные поверхности не параллельны между собой, то $h_{изм} \neq h'_{изм} \neq h''_{изм}$. Следовательно, мы видим, что высота точки B над точкой O зависит от того, по какому пути выполняется нивелирование, что приводит к неопределенности определения отметки точки земной поверхности из результатов геометрического нивелирования.

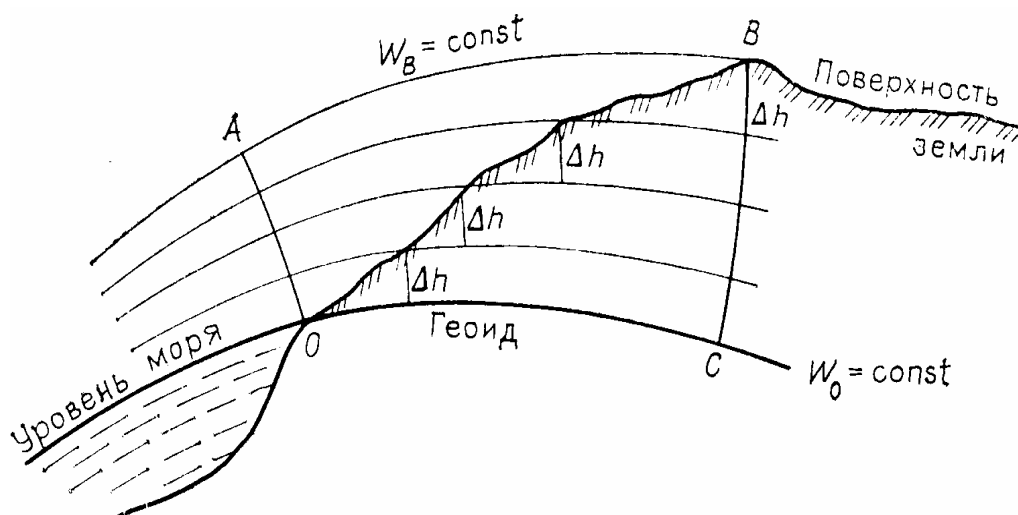


Рис. 11.2. Зависимость результатов геометрического нивелирования от пути нивелирования вследствие непараллельности уровенных поверхностей в разных точках земной поверхности (для наглядности уровенная поверхность, проходящая через начальный репер секции O , совмещена с уровнем моря)

Чтобы избежать этой неопределенности, в практику нивелирных работ введено четыре системы высот:

1. **Приближенная**, в которой не принимается во внимание реальное гравитационное поле Земли.
2. **Ортометрическая**, в которой под ортометрической высотой $H_{орт.}$ понимают расстояние от поверхности геоида до точки земной поверхности, отсчитываемое по отвесной линии.

$$H_{орт.} = \frac{W_B - W_0}{g}, \quad (11.1)$$

где W_B, W_0 – действительный потенциал силы тяжести уровенных поверхностей, проходящих, соответственно, через точку O (начало счета высот) и точку B ;

g – ускорение действительной силы тяжести.

3. **Нормальная**, где под нормальной высотой H^γ понимают расстояние от поверхности квазигеоида до точки земной поверхности, отсчитываемое по нормали к эллипсоиду.

$$H^\gamma = \frac{W_M - W_0}{\gamma}, \quad (11.2)$$

где γ – ускорение нормальной силы тяжести.

4. **Динамическая**, в которой за динамическую высоту H_δ принимают нормальную высоту, приведенную к широте 45° .

$$H_{\delta} = \frac{W_M - W_0}{\gamma_{B=45^{\circ}}}. \quad (11.3)$$

Детально с этими высотами мы ознакомимся в курсе геодезической гравиметрии. Сейчас только отметим, что в странах бывшего СССР и странах восточной Европы в качестве основной принята **система нормальных высот**, которую ввел М.С. Молоденский. *Нормальные высоты наиболее удобны для практических целей, т.к. они не зависят от пути нивелирования и от распределения плотности масс внутри Земли.* При обработке геометрического нивелирования всегда вводится поправка за переход к нормальным высотам.

Исходная уровенная поверхность. За исходное начало счета высот в Беларуси и странах бывшего СССР принята уровенная поверхность, проходящая через нуль Кронштадского футштока. Эта система называется *Балтийской*. Практически нуль Кронштадского футштока представляет собой горизонтальную черту на медной пластине, которая укреплена на устое моста через Обводной канал в Кронштадте. Устройство Кронштадтского футштока показано на рис. 11.3.

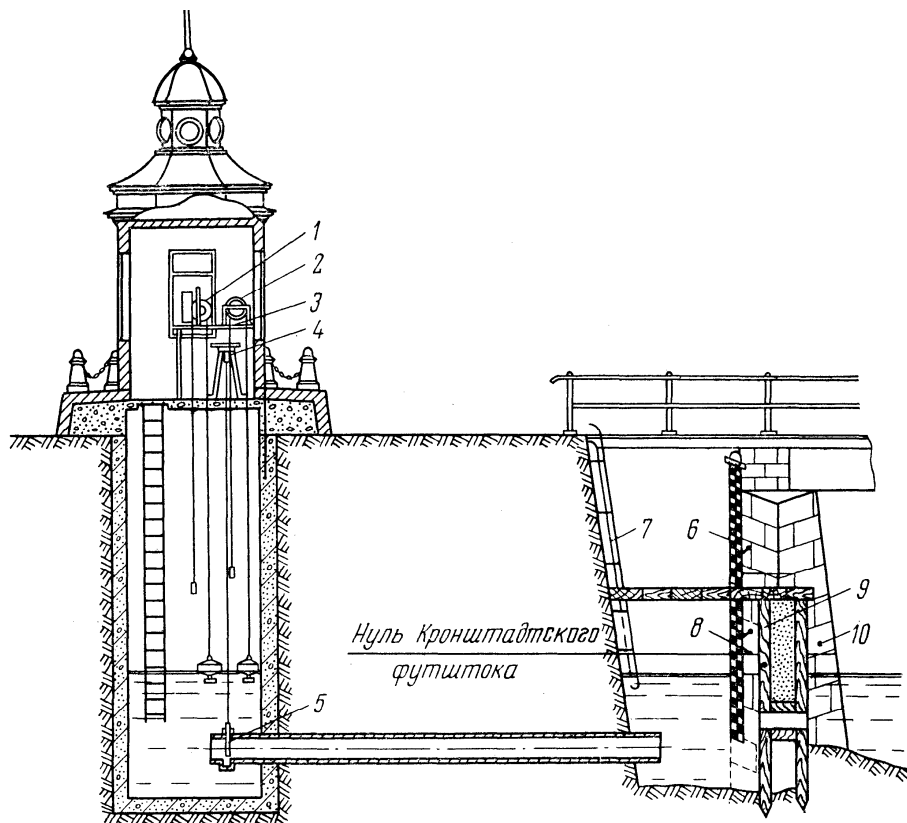


Рис. 11.3. Устройство Кронштадтского футштока: 1 – мареограф; 2 – копинист; 3 – столик мареографа; 4 – шток задвижки; 5 – задвижка Лудло; 6 – футшток; 7 – металлический трап; 8 – пластина Тонберга; 9 – отстойник мареографа; 10 – устой моста

11.3. Классификация нивелирных знаков

Как уже упоминалось выше, все нивелирные линии на местности закрепляются нивелирными знаками.

Нивелирные знаки делятся на *фундаментальные реперы, рядовые и временные*. Для специальных целей закрепление производят еще глубинными реперами.

Фундаментальный репер области сезонного промерзания состоит из железобетонного пилона в виде усеченной четырехгранной пирамиды, составляющей единое целое с расположенной внизу железобетонной плитой (рис. 11.4).

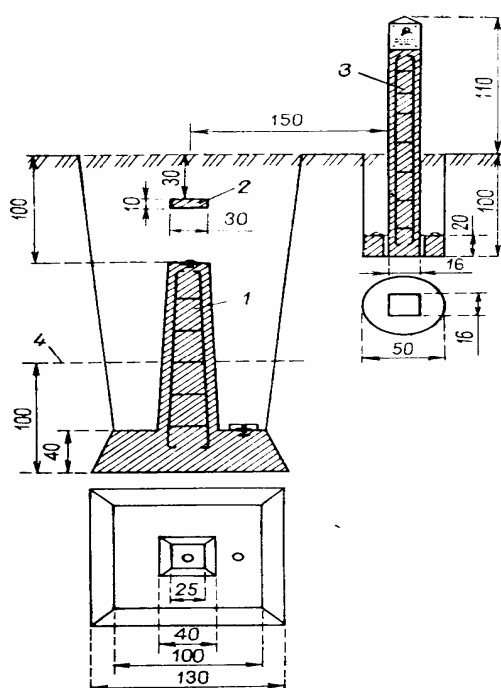


Рис. 11.4. Фундаментальный репер

При наличии монолитной скальной породы закладывают фундаментальные реперы для скальных грунтов.

Фундаментальные реперы закладываются по линиям нивелирования I и II классов через 50 – 60 км; в 50 – 150 м от фундаментального репера закладывается репер-спутник.

Рядовые нивелирные знаки делятся на следующие виды:

- а) грунтовые реперы (рис. 11.5);
- б) скальные реперы;
- в) скальные марки;
- г) стенные реперы;
- д) стенные марки.

Временные нивелирные знаки закладываются на короткий срок и закрепляются деревянными столбиками с гвоздиками или костью.

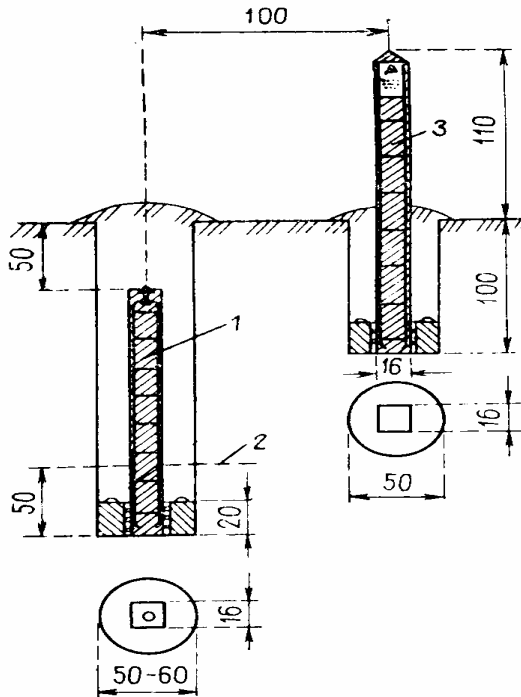


Рис. 11.5. **Грунтовый репер** (тип 5):
 1 – железобетонный пилон с маркой и якорным устройством; 2 – граница промерзания (оттаивания грунта); 3 – опознавательный знак

Глубинные реперы закладываются на большие глубины (~ 10 м и более) на специальных линиях нивелирования повышенной точности. Например, на геодинамических полигонах при наблюдении за вертикальными деформациями земной поверхности; на пунктах строительства АЭС при выборе тектонически спокойного участка строительства; при наблюдении за осадками особо важных инженерно-технических сооружений: плотин ГЭС, турбогенераторов ТЭЦ, реакторов АЭС и т.д.

Нивелирные знаки закрепляются на местности центрами, которые подразделяются еще на типы в зависимости от конструкции. Типы центров нивелирных знаков даны в специальном альбоме центров. Они разработаны в ЦНИИГАиК и применяются в зависимости от климатических условий конкретной местности, грунта, глубины промерзания почвы и т.д.

Основным требованием, предъявляемым к закладке центров нивелирных знаков, является требование долговременной сохранности знаков и устойчивости во времени, исключая перемещение реперов в результате современных движений земной коры, землетрясений, извержений вулканов и т.д.

Наиболее благоприятной является закладка реперов в скальные породы. С целью быстрого отыскания нивелирные реперы должны по возможности закладываться вблизи долговечных ориентиров.

Лекция 12

ПРИБОРЫ ДЛЯ НИВЕЛИРОВАНИЯ I И II КЛАССОВ. ПОВЕРКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ

12.1. Общие сведения о высокоточных нивелирах

При нивелировании I и II классов в нашей стране применяют глухие нивелиры с уровнем (Н05, Н1, Ni004), нивелиры с компенсатором (Ni002, ReNi002, Ni007), электронные нивелиры (Dini12) и нивелирные штриховые и штрих-кодовые (для электронных нивелиров) инварные рейки. Все эти приборы должны удовлетворять требованиям «Инструкции по нивелированию I, II, III и IV классов» (М., Недра, 1991 г.) и ГОСТа 10528-76, приведенным в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Требования, предъявляемые к высокоточным нивелирам

Основные параметры	Класс нивелирования	
	I	II
Нормальная длина визирного луча	50	65 и 50*
СКО определения превышения на станции, мм	0,15	0,20
СКО на 1 км двойного хода	0,5	1,0
Увеличение зрительной трубы не менее, крат	44	40
Цена деления цилиндрического контактного уровня на 2 мм не более	12"	12"
Точность самоустановки компенсатора менее	0,2"	0,2"
Допустимое отклонение от номинала любого метрового интервала инварной рейки, мм	0,10	0,30
То же при нивелировании в горах и на геодинамических полигонах	0,05	0,10
Изменение угла i при изменении t^0 нивелира на 1 °С менее	0,5"	0,5"

* при работе нивелиром Ni007

Кроме того, высокоточные нивелиры должны работать в интервале температур от -30 до +50 °С.

Высокоточные нивелиры по способу установления визирной оси в горизонтальное положение подразделяются на глухие и с компенсатором. Получившие в последнее время широкое распространение во всем мире высокоточные электронные нивелиры также снабжены компенсатором.

Глухие нивелиры. К глухим нивелирам относятся нивелиры Н-05, Н1, Ni004 и т.д. (рис. 12.1). Ось визирования этих нивелиров приводится в горизонтальное положение с помощью контактного цилиндрического уровня, изображение пузырька которого передано в поле зрения трубы, и соединенного с ним элевационного винта. Вращение элевационного винта

позволяет точно вывести уровень на середину путем совмещения концов его пузырька перед взятием отсчета по рейке.

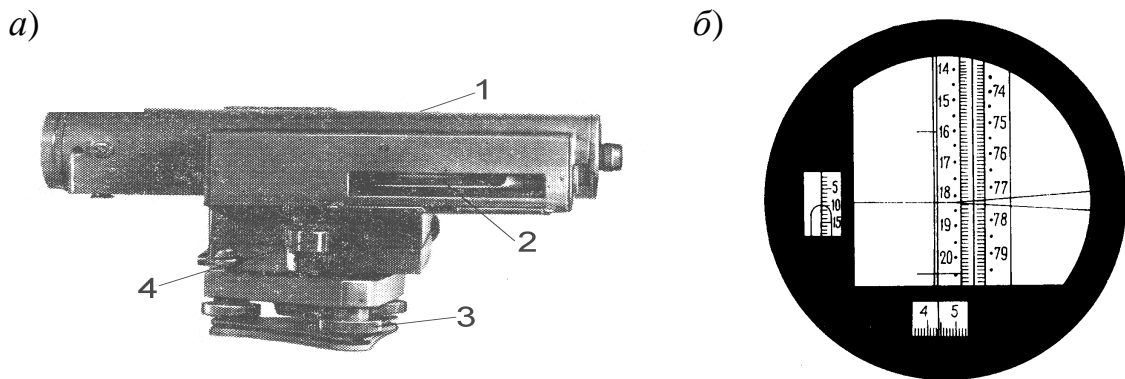


Рис. 12.1. Нивелир Н05 (а) с изображением поля зрения трубы (б):

1 – зрительная труба в термоизолирующем кожухе; 2 – контактный уровень; 3 – подставка нивелира; 4 – установочный уровень; б – поле зрения трубы

Глухие нивелиры имеют оптический микрометр для точного наведения биссектора сетки нитей на штрих рейки (см. рис. 12.1, б). Как правило, оптический микрометр в глухих нивелирах выполнен в виде плоскопараллельной пластинки и механизма, наклоняющего ее, с отсчетным приспособлением (рис. 12.2).

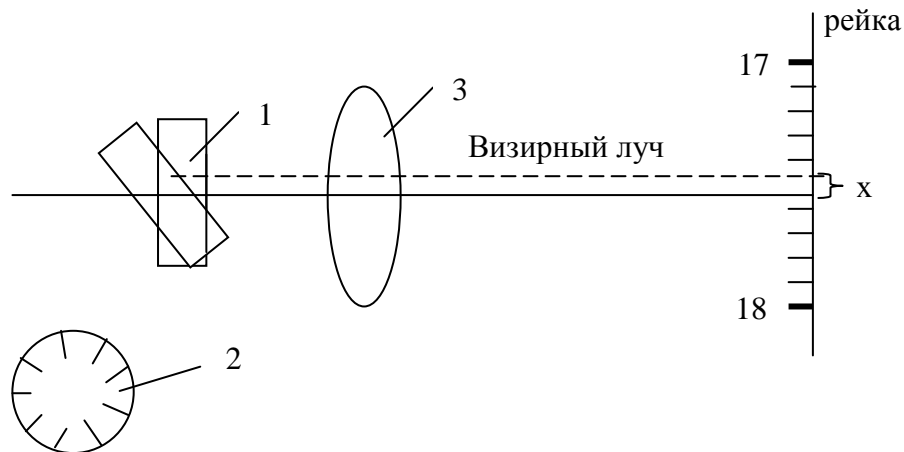


Рис. 12.2. Устройство оптического микрометра у нивелиров типа Н05:

1 – плоскопараллельная пластинка; 2 – барабан оптического микрометра

Наклоняя плоскопараллельную пластинку вращением барабана оптического микрометра, мы начинаем параллельно смещать визирный луч, добиваясь его совмещения с первым младшим штрихом рейки. Отсчет по барабану оптического микрометра будет соответствовать отрезку x на рис. 12.2.

У нивелира Н-05 изображение отсчета по оптическому микрометру передано в поле зрения трубы, что существенно упрощает работу.

Нивелиры с компенсатором. К высокоточным нивелирам с компенсатором относятся такие нивелиры как Ni002 (рис. 12.3), ReNi002, Ni007.

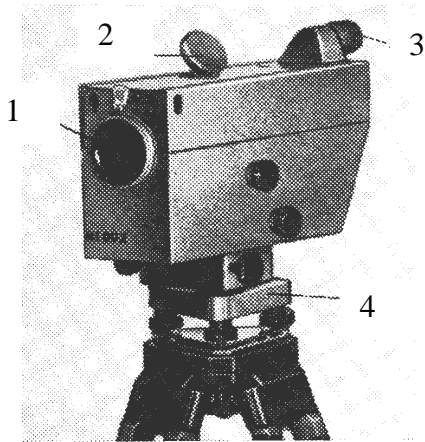


Рис. 12.3. Нивелир с компенсатором Ni002:
1 – объектив; 2 – зеркало установочного уровня;
3 – окуляр; 4 – подставка нивелира

Это удобные нивелиры. Они повышают производительность труда на 10 – 15 % по сравнению с нивелирами с уровнем и облегчают труд нивелировщика. Главная особенность нивелиров с компенсаторами заключается в том, что приведение визирной оси нивелира в горизонтальное положение производится не с помощью контактного уровня, а с помощью специального компенсатора. Компенсатор по существу работает в автоматическом режиме, т.к. линия визирования на каждой станции как бы самоуставляется в горизонтальное положение.

Принцип работы нивелира с компенсатором можно понять из следующего примера. Обратимся к рис. 12.4.

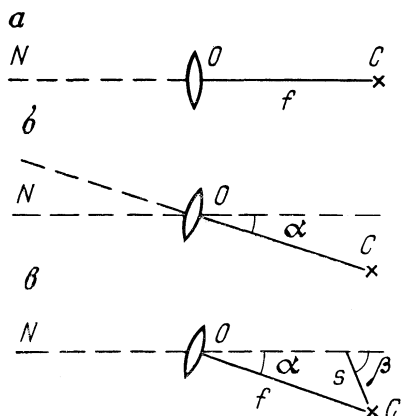


Рис. 12.4. Принцип работы нивелира с компенсатором: O – объектив зрительной трубы нивелира; f – фокусное расстояние объектива зрительной трубы нивелира; s – расстояние от компенсатора до сетки нитей; β – угол отклонения луча компенсатором

Предположим, что точка N рейки, находящейся на некотором расстоянии L от нивелира, оптический центр объектива O и центр сетки нитей C лежат на одной горизонтальной прямой. В этом случае визирная линия нивелира горизонтальна, изображение точки N совмещено с центром сетки нитей C (см. рис. 12.4, a) и отсчет по рейке равен N .

Наклоним зрительную трубу нивелира относительно оптического центра объектива на угол α . Центр сетки нитей C сместится относительно первоначального положения на αf (см. рис. 12.4, б), отсчет по рейке изменится на величину $L\alpha$ и станет равным $N + L\alpha = N'$.

Если же каким-либо способом совместим изображение точки N с центром сетки нитей C , не меняя наклона трубы нивелира, и получим первоначальный отсчет по рейке N , соответствующий горизонтальному положению визирной линии (см. рис 12.4, а), то в этом случае зрительная труба будет как бы горизонтальна. Это совмещение изображения центра сетки нитей с отсчетом N производит компенсатор нивелира. Имеется несколько способов для совмещения изображения точки N рейки с центром сетки нитей C . В одних нивелирах при наклоне сетка нитей смещается на величину αf (нивелиры фирмы «Сальмонраги»), в других изменяется ход лучей (Ni002, Ni007).

В настоящее время выпускается около 50 типов нивелиров с компенсаторами разных классов точности.

Основное требование к компенсаторам – это соблюдение равенства

$$f \cdot \alpha = S \cdot \beta \text{ или } \frac{\alpha}{\beta} = \frac{S}{f}. \quad (12.1)$$

Отношение $\frac{\alpha}{\beta}$ называется коэффициентом увеличения компенсатора.

Электронные цифровые нивелиры. Данный класс нивелиров представляет собой комплексную измерительную систему, являющуюся полностью автоматизированной системой для сбора и обработки данных в цифровом виде и обеспечивающую высокую эффективность выполнения работ на базе самых современных технологий. Электронные нивелиры снабжены компенсатором, а также температурными датчиками, не имеющими внешнего доступа. Высокоточные электронные нивелиры, выпускаемые фирмами Trimble, Leica, Topcon, удобны в обращении, дают надежные результаты, так как с помощью автоматизации процесса измерений и обработки практически сводят к нулю влияние личных ошибок нивелировщика. Тем не менее, следует помнить, что цифровой нивелир – это тот же оптический нивелир только с автоматическим сбором, хранением и обработкой данных. Поэтому все основные условия для выполнения высокоточных измерений должны выполняться и для цифровых нивелиров. Внешний вид нивелира Dini 12, выпускаемый фирмой «Trimble» показан на рис. 12.5.

Технические характеристики высокоточных нивелиров даны в табл. 12.2.



Рис. 12.5. Цифровой нивелир Dini 12

Таблица 12.2

Технические характеристики высокоточных нивелиров

Название нивелира	Фирма или страна-изготовитель	Тип нивелира	СКО в мм на 1 км двойного хода
Dini 12	Trimble	Цифровой	0,3 мм/км
DL-101C	Topcon	Цифровой	0,4 мм/км
DNA03	Leica	Цифровой	0,3 мм/км
H05	Россия	Уровеньный	0,5 мм/км
Ni002, ReNi002	Германия	С компенсатором	0,5 мм/км

12.2. Нивелирные рейки, используемые при высокоточном нивелировании

При нивелировании I и II классов применяются штриховые или кодовые инварные рейки. Как правило, эти рейки имеют деревянный корпус, на который натягивается инварная лента с силой натяжения 20 кг. Длина деревянного корпуса рейки равна 3 060 мм, длина инварной ленты – 3 000 мм.

На инварной ленте штриховой рейки нанесены 2 шкалы штрихов: основная и дополнительная (рис. 12.6). Дополнительная шкала, как правило, смещена относительно основной на 2,5 мм. Расстояние между осями штрихов равно 5 мм. Нумерация штрихов основной шкалы идет от 0 до 60, дополнительной – от 60 до 119. Нижняя плоскость пятки совпадает с нулевым штрихом основной шкалы. Нуль у дополнительной шкалы смещен на 5 925 полумиллиметров.

Каждая рейка снабжена круглым уровнем и ручками. Во время взятия отсчетов по рейке ее устанавливают в отвесное положение по уровню и удерживают в этом положении при помощи подпорок. В комплект реек входят съемочные подпятники в виде кольца, которые применяются в тех случаях, когда качество изготовления пяток рейки не удовлетворяет требованиям инструкции.

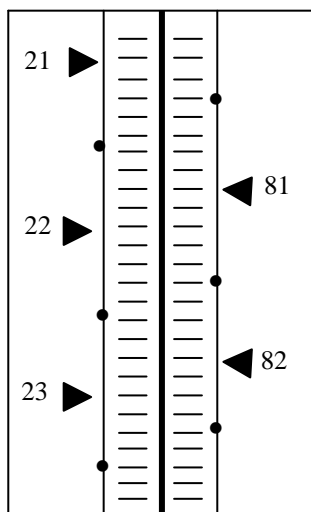


Рис. 12.6. Инварная шкала штриховой рейки

Для привязки нивелирных ходов к стенным маркам используется подвесная рейка длиной 1,2 м. Нулевой штрих основной шкалы подвесной рейки совмещен с центром 2 мм круглого отверстия, за которое подвешивается рейка.

Точность нивелирования в конечном итоге зависит не только от качества нивелиров, квалификации нивелировщика, но и в равной мере от качества нивелирных реек и точности нанесения делений на них.

Поэтому все нивелирные рейки наряду с нивелирами проходят специальные поверки и исследования, о которых мы поговорим ниже.

12.3. Поверки и исследования высокоточных нивелиров и реек

Поверки и исследования высокоточных нивелиров и реек, как и других геодезических инструментов, выполняют с целью получения данных по пригодности их для выполнения нивелирных работ требуемого класса точности, а также для приведения нивелира в рабочее состояние.

Для *штриховых инварных нивелирных реек*, предназначенных для нивелирования I и II классов, контрольные испытания заключаются в следующем:

1. Поверка степени натяжения инварных полос

Поверка выполняется перед компарированием рейки: с помощью точного динамометра измеряют силу натяжения инварных полос, которая должна быть равна (20 ± 1) кг.

2. Определение стрелки прогиба рейки

Для определения стрелки прогиба рейку укладывают горизонтально на боковое ребро, затем натягивают тонкую металлическую проволоку или нить между концами рейки и при помощи линейки или миллиметровой бумаги измеряют расстояния от натянутой нити до инварной полосы около делений 2, 30 и 58 рейки. По измеренным расстояниям определяют величину стрелки прогиба, которая не должна превышать 3 мм.

$$f = a_2 - \frac{a_1 + a_3}{2}, \quad (12.2)$$

где f – стрелка прогиба;

a_1, a_2, a_3 – расстояния от натянутой нити до инварной полосы, соответственно, возле делений 2, 30, 58. Поверку выполняют 1 раз в два месяца во время полевых работ.

3. *Поверка перпендикулярности плоскости пятки рейки к оси рейки и определение разностей высот нулей шкал реек*

Эти поверки выполняют 1 раз в год перед выездом на полевые работы.

Порядок выполнения первой части поверки заключается в следующем:

- устанавливают нивелир на расстоянии 15 м от костыля с овальной головкой;
- берут последовательно отсчеты по основной и дополнительной шкалам рейки, устанавливаемой на костыль различными точками пятки (2 постановки по левому краю, 2 – по правому краю и одна постановка по центру пятки). Разность отсчетов при различных постановках рейки должна быть $\leq 0,10$ мм.

При *определении разности высот нулей шкал реек*, используемых в комплекте, забивают 3 костыля, в 15 м от которых устанавливают нивелир. Затем берут отсчеты по рейкам, последовательно устанавливая их на 3 костыля. Разность высот нулей шкал реек, используемых в комплекте должна быть $\leq 0,10$ мм.

4. *Поверка установочного круглого уровня на рейке*

Поверяют ежедневно перед началом работ при помощи отвеса, укрепленного на рейке или по вертикальной нити нивелира.

5. *Определение ошибок делений инварных реек*

Данное исследование является одним из наиболее важных. Поэтому разберем его подробнее.

Штрихи на шкалах инварных реек наносят двумя способами:

- путем фотографического копирования образцовых шкал;
- с помощью тщательно изготовленных бумажных трафаретов шкал.

Оба эти способа далеко несовершенны, а инструкция по нивелированию требует, чтобы ошибки наименьших (5 мм) делений реек и ошибки длины любого метрового интервала рейки были, соответственно, не более 0,05 мм и 0,10 мм.

Точное положение любого i -ого штриха рейки задается расчетным расстоянием l_i между начальным и текущим штрихом. Фактическое расстояние штрихов рейки характеризуется расстоянием l'_i . Разность $\Delta_i = l_i - l'_i$ представляет собой поправку за неточность нанесения штриха. Фактически нам нужно знать эту поправку для каждого штриха рейки. Но это достаточно трудоемкая задача. Поэтому на практике задачу исправления превышений за ошибки нанесения штрихов рейки решают только в первом приближении.

Для этого на компараторе на каждой шкале входящих в комплект реек измеряют дециметровые и метровые интервалы, вычисляя для каждой рейки среднее значение метра l'_1 и l'_2 . Затем находят среднюю длину одного метра комплекта реек $l' = \frac{1}{2}(l'_1 + l'_2)$, а отличие средней длины метра комплекта реек от номинальной определяется как разность

$$\varepsilon = l - l', \quad (12.3)$$

где ε – отличие средней длины метра комплекта реек от номинала;

$l = 1\,000,000$ мм – номинальная длина;

l' – фактическая средняя длина метра комплекта реек, полученная при компарировании.

Отклонение ε (в мм) приходится на каждый метр превышения, измеренного между реперами. Поэтому поправка $\delta h_{(мм)}$ в измеренное превышение h за отличие средней длины метра комплекта реек от номинальной будет равна

$$\delta h_{(мм)} = \varepsilon \cdot h. \quad (12.4)$$

СКО определения поправки δh вычисляется по формуле

$$m_{\delta h} = \sqrt{m_{\varepsilon}^2 \cdot h^2 + m_h^2 \cdot \varepsilon^2}. \quad (12.5)$$

Эталонирование шриховых инварных реек (определение отклонения средней длины метра комплекта реек от номинала) выполняют два раза в год (до начала полевого сезона и после его окончания) либо на компараторах типа МК-1 ($m_{\varepsilon} = 0,01 - 0,02$ мм), либо на интерференционном компараторе МИИГАиК.

Контрольные испытания высокоточных нивелиров

Программы проверок и исследований для уровенных нивелиров и нивелиров с компенсаторами несколько отличаются друг от друга. Поэтому рассмотрим их отдельно.

Проверки и основные исследования уровенных нивелиров выполняют в следующей последовательности:

- 1) осмотр нивелира;
- 2) проверка и регулирование хода подъемных винтов;
- 3) проверка плавности вращения инструмента вокруг его оси;
- 4) проверка перпендикулярности оси цилиндрического уровня к оси вращения нивелира;

- 5) поверка и исследование установки сетки нитей;
- 6) поверка и исправление установки цилиндрического уровня (поверка главного условия нивелира);
- 7) поверка и исследование установки круглого уровня;
- 8) исследование правильности хода фокусирующей линзы;
- 9) исследование цилиндрического уровня (определение цены деления, определение ошибки взгляда из-за неточной установки пузырька уровня в нуль-пункт);
- 10) исследование оптических и измерительных качеств зрительной трубы; определение коэффициента дальномера и асимметрии нитей; определение ошибки наведения;
- 11) исследование работы механизма, наклоняющего плоскопараллельную пластинку; определение цены деления барабана микрометра;
- 12) испытание работы элевационного винта и определение цены его оборота.

Программа поверок и исследований нивелиров с компенсаторами отличается от программы для уровенных нивелиров лишь тем, что в ней вместо пунктов 4, 6, 9, 12, связанных с исследованием цилиндрического уровня и элевационного винта, включены следующие поверки и исследования, связанные с наличием компенсатора:

- а) определение диапазона действия компенсатора;
- б) определение времени затухания колебаний маятника компенсатора;
- в) определение степени компенсации углов наклона визирной оси;
- г) поверка горизонтальности линии визирования.

Методику выполнения всех перечисленных исследований вы можете найти в «Справочнике геодезиста», Инструкции по нивелированию и «Практическом руководстве по нивелированию I и II классов».

Разберем подробно *поверку главного условия нивелира*.

Геометрический смысл главного условия нивелира заключается в том, что проекции визирной оси трубы и оси уровня на горизонтальную и отвесную плоскости должны быть параллельны между собой соответственно в каждой плоскости.

Поверка состоит из двух частей, т.е. вначале проверяют параллельность проекций этих осей на горизонтальную плоскость, а затем – на отвесную.

Первую часть поверки выполняют путем поворота уровня вместе с трубой относительно визирной оси трубы с помощью двух подъемных винтов.

Для этого нивелир устанавливают в 50 м от закрепленной рейки (рис. 12.7) так, чтобы один из подъемных винтов находился в отвесной плоскости, проходящей через визирную ось трубы, а два других – на линии, перпендикулярной визирной оси.

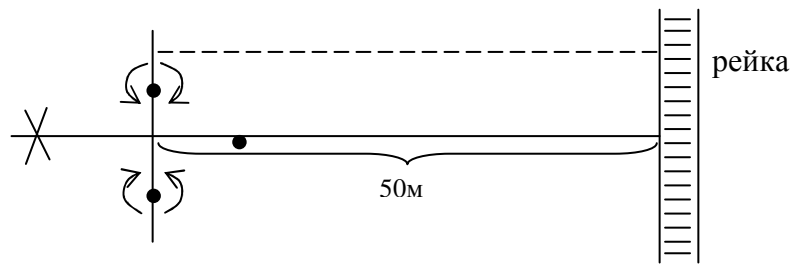


Рис. 12.7. Иллюстрация к выполнению первой части проверки главного условия нивелира

Тщательно приводят ось вращения нивелира в отвесное положение и, установив пузырек уровня в нуль-пункт, отсчитывают по рейке. Затем плавными поворотами подъемных винтов в разные стороны придают нивелиру боковые наклоны вначале в одну, затем в другую сторону, следя, чтобы отсчет по рейке не изменился. Если в обоих случаях изображения концов пузырька уровня не расходились или смещались в одну и ту же сторону одинаково, то уровень установлен правильно. Если пузырек смещался с нуль-пункта в разные стороны более, чем на 1 – 2 деления уровня, то установку цилиндрического уровня исправляют боковыми исправительными винтами.

Вторая часть проверки главного условия нивелира, когда определяется угол i , т.е. угол между проекциями на отвесную плоскость оси цилиндрического уровня и визирной оси трубы, может быть выполнена несколькими способами. Изложим самый простой из них, который чаще всего применяется в полевых условиях.

Схема этого способа следующая (рис. 12.8):

1. Разбиваем базис AB длиной 50 метров.
2. Устанавливаем нивелир вблизи точки B базиса (верхний рисунок) и берем отсчеты с этой установки прибора по одной и той же рейке, установленной вначале на точку B (отсчет u_1 по ближней рейке), а затем – на точку A (отсчет a_1' по дальней рейке).
3. Переставляем нивелир вблизи точки A (нижний рисунок) и берем последовательно отсчеты по рейке, установленной на точку A (отсчет u_2 по ближней рейке), а затем – на точку B (отсчет a_2' по дальней рейке).
4. Отсчеты u_1 и u_2 по ближним рейкам можно считать свободными от влияния угла i , а отсчеты a_1' и a_2' – искаженными влиянием угла i на величину x . Обозначив через a_1 и a_2 истинные отсчеты по дальней рейке, выразим превышение h_{AB} , полученное при каждой постановке нивелира,

$$\begin{aligned}
 h_{AB} &= a_1 - u_1 = (a_1' + x) - u_1, \\
 h_{AB} &= u_2 - a_2 = u_2 - (a_2' + x),
 \end{aligned}
 \tag{12.6}$$

где x – влияние угла i на отсчет по рейке.

Из формулы (12.6) следует, что

$$(a_1' + x) - u_1 = u_2 - (a_2' + x),$$

отсюда

$$x = \frac{(u_1 + u_2) - (a_1' + a_2')}{2}, \tag{12.7}$$

$$\operatorname{tgi} = \frac{x}{S},$$

$$i'' = \frac{x}{S} \cdot \rho'' = \rho'' \frac{(u_1 + u_2) - (a_1' + a_2')}{2S}. \tag{12.8}$$

Угол i должен быть меньше $10''$. При превышении указанного допуска угол i уменьшают в зависимости от конструкции уровенного нивелира или исправительными винтами уровня, или исправительными винтами сетки нитей, или поворотом оптического клина, расположенного перед объективом трубы.

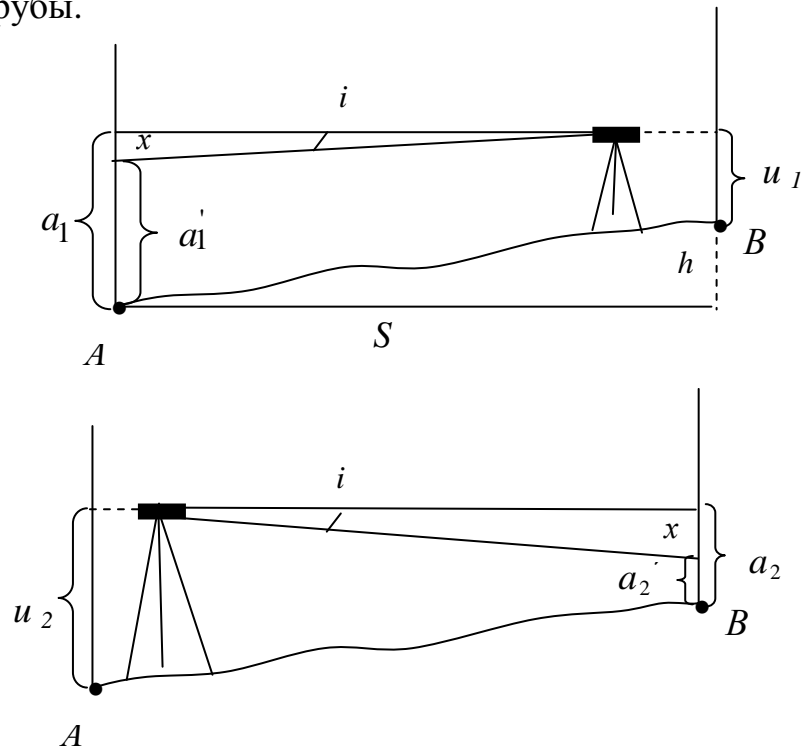


Рис. 12.8. Определение угла i : AB – базис длиной $S = 50$ м

Лекция 13

ИСТОЧНИКИ ОШИБОК ПРИ ВЫСОКОТОЧНОМ НИВЕЛИРОВАНИИ И МЕТОДЫ ОСЛАБЛЕНИЯ ИХ ВЛИЯНИЯ. МЕТОДИКА ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

13.1. Источники ошибок при высокоточном нивелировании и методы ослабления их влияния

Ошибки при высокоточном нивелировании бывают случайные и систематические. В свою очередь, все эти ошибки делятся еще на личные, инструментальные и ошибки за счет влияния внешних условий.

Проблема ошибок в высокоточном нивелировании довольно сложная. Дело в том, что с помощью высокоточного нивелирования часто решают задачи определения величин, соизмеримых с ошибками измерений (определение вертикальных деформаций земной поверхности, наблюдения за движением оползней, осадками крупных инженерных сооружений и т.д.), которые достаточно квалифицированно можно решить лишь при условии глубокого знания источников ошибок и методов ослабления их влияния. Рассмотрим общепринятые подходы к ослаблению влияния основных ошибок высокоточного нивелирования.

1. *Влияние угла i* (проекции на отвесную плоскость угла между визирной осью трубы и осью цилиндрического контактного уровня) на результаты нивелирования.

Вычертим схему влияния угла i на отсчеты по рейкам (рис. 13.1).

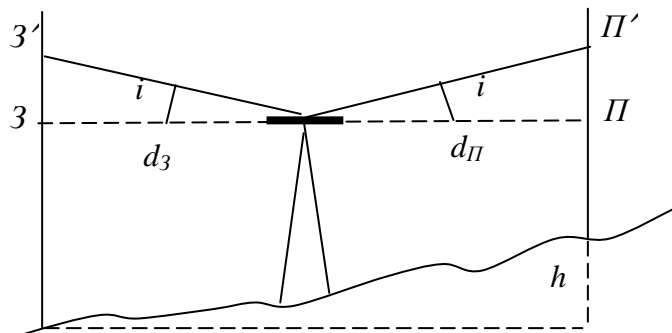


Рис. 13.1. Влияние угла i на результаты нивелирования:

$3, П$ – истинные отсчеты по задней и передней рейкам ($i = 0$); $3', П'$ – фактические отсчеты по задней и передней рейкам ($i \neq 0$); $d_3, d_{П}$ – расстояния от нивелира до задней и до передней реек; h – превышение на станции

Согласно обозначениям, данным на рис. 13.1, можно записать:

$$З = З' - d_3 \cdot \operatorname{tgi}, \quad (13.1)$$

$$П = П' - d_{II} \cdot \operatorname{tgi}.$$

Тогда превышение h на станции, свободное от влияния угла i , будет равно

$$h = (З - П) = (З' - П') - \operatorname{tgi}(d_3 - d_{II}). \quad (13.2)$$

По аналогии с (13.2) можно записать выражение для превышения ΔH по секции, равное Σh , т.е.

$$\Delta H = \Sigma h = \Sigma(З' - П') - \operatorname{tgi} \Sigma(d_3 - d_{II}). \quad (13.3)$$

Второй член в формулах (13.2 – 13.3) есть поправка в превышение за влияние угла i . При $d_3 = d_{II}$ эта поправка исключается. Поэтому нивелирование выполняется из середины, и методика нивелирования требует, чтобы разности расстояний $(d_3 - d_{II})$ на каждой станции и накопление их по секции $\Sigma(d_3 - d_{II})$ не превышали установленных допусков. Например, при нивелировании I класса требуется, чтобы на каждой станции $(d_3 - d_{II}) \leq 0,5$ м, а в секции накопление этих разностей было не более 1 м. Кроме того, устанавливается допуск на угол i ($i \leq 10''$).

Однако этих мер для защиты результатов нивелирования от влияния угла i недостаточно, т.к. сам угол i может изменяться в процессе нивелирования в зависимости от изменения t^0 окружающего воздуха. Поэтому методика производства высокоточного нивелирования предусматривает еще следующие дополнительные меры для уменьшения влияния угла i :

- а) применение нивелиров с теплозащитным корпусом, у которых угол i изменяется не более, чем на $0,5''$ при изменении t^0 на 1°C ;
- б) наблюдения на станциях следует выполнять по строго симметричной во времени программе измерений (ЗППЗ или ПЗЗП);
- в) прямой и обратный ходы прокладывать один утром, другой – вечером, т.е. при разных знаках приращения t^0 воздуха;
- г) необходимо тщательно защищать нивелир от солнца как во время работы на станции, так и при переходе от одной станции к другой;
- д) перед началом работ нивелир следует выдерживать в тени на штативе не менее 45 минут.

2. Систематическое влияние вертикальных перемещений костылей и штативов на результаты нивелирования.

В высокоточном нивелировании рейки, как правило, устанавливаются на костыли, которые в большинстве случаев оседают под воздействием собственной массы, массы реек и неизбежного нажима на рейку. Штатив, на котором расположен нивелир, также испытывает вертикальные перемещения вследствие того, что вокруг него топчется нивелировщик, а также по ряду других причин. Исследования показали, что в подавляющем большинстве случаев штатив подвергается выпиранию, т.е. в обоих случаях эти влияния систематические. Меры их ослабления следующие:

- а) трассы прямого и обратного нивелирных ходов должны совпадать и проходить по возможности на всем протяжении по грунтам средней плотности;
- б) число станций в прямом и обратном ходах должны быть четным и одинаковым;
- в) программа наблюдений на станции должна быть строго симметричной во времени;
- г) порядок наблюдений на смежных станциях следует чередовать: на нечетной станции наблюдения начинать с задней, а на четной – с передней рейки; в обратном ходе наоборот;
- д) по ходам нивелирования I класса костыли следует закреплять не ближе 0,5 м друг от друга;
- е) штатив следует устанавливать без перекоса и во время работы защищать от солнца;
- ж) отсчеты по рейке, установленной на костыль, следует брать не ранее, чем через 30 секунд;
- з) нивелирование выполнять участками 20 – 30 км по схеме «восьмерка», т.е. одну половину секций участка сначала проходить в прямом направлении, а вторую в обратном.

3. Влияние наклона рейки (рис. 13.2).

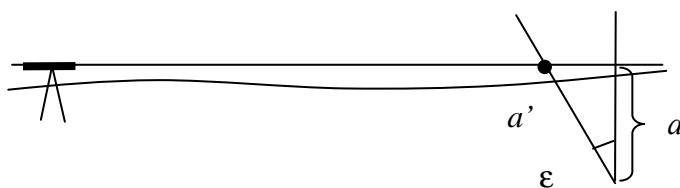


Рис. 13.2

Это влияние носит систематический характер, т.к. всегда увеличивает отсчет по рейке до величины

$$a' = \frac{a}{\cos \varepsilon},$$

где ε – наклон рейки.

Для уменьшения этого влияния рейка снабжается круглым уровнем.

4. *Влияние разностей высот нулей реек* исключают путем соблюдения требования четного числа станций в секции.

5. *Влияние вертикальной рефракции.* Для уменьшения этого влияния необходимо:

- а) применять строго симметричную по времени программу наблюдений на станции, сократив до минимума время наблюдений;
- б) прокладывать прямой и обратный ходы в разное время дня;
- в) строго соблюдать требования инструкции о высоте визирного луча над землей и расстоянии от нивелира до реек:

	I класс	II класс
Высота визирного луча	$\geq 0,8$ м	$\geq 0,5$ м
Расстояние от нивелира до рейки	≤ 50 м	≤ 60 м

6. *Влияние отличия t^0 нивелирования от t^0 компарирования рейки.*

Как мы знаем, шкала деления на высокоточных нивелирных рейках изготавливается из инвара, который, как и любой реальный материал, обладает способностью изменять свои размеры при изменении t^0 .

Компарирование реек, т.е. определение длин метровых интервалов, выполняется при одной температуре (t_K), а нивелирование по трассе – при другой – (t_H). Разность температур нивелирования и компарирования неизбежно вызовет изменение средней длины метра комплекта реек. Следовательно, в результаты нивелирования нужно ввести поправку за эту температурную разность, которую приближенно можно вычислить по формуле

$$\delta h_t = \alpha (t_H - t_K) \cdot h, \quad (13.4)$$

где δh_t – поправка за температуру;

h – превышение по секции;

α – средний коэффициент инварного расширения;

t_H – средняя температура нивелирования по секции;

t_K – температура компарирования реек.

Строгий учет температурного влияния на результаты высокоточного нивелирования предусматривает измерение температуры каждой рейки на каждой станции и введение поправки в отсчет по каждой рейке согласно формуле

$$\delta h_t = \alpha_3 (t_3 - t_3^K) Z - \alpha_{II} (t_{II} - t_{II}^K) II, \quad (13.5)$$

где $t_3, t_{II}, t_3^K, t_{II}^K$ – температуры нивелирования и компарирования, соответственно, задней и передней реек;

α_3, α_{II} – коэффициенты инварного расширения для задней и передней реек;

Z и II – отсчеты по задней и передней рейкам.

Тогда по секции формула для введения поправки за температуры будет иметь вид

$$\delta h_t = \alpha_3 \sum_1^n ((t_3 - t_3^K) Z) - \alpha_{II} \sum_1^n ((t_{II} - t_{II}^K) II), \quad (13.6)$$

где n – число станций в секции.

13.2. Методика высокоточного нивелирования

Методика высокоточного нивелирования разработана таким образом, чтобы максимально уменьшить влияние перечисленных ошибок на измеренные превышения, используя рекомендации предыдущего раздела. Она изложена в инструкции по государственному нивелированию, в которой также даны основные допуски и требования к производству высокоточного нивелирования. Их надо неукоснительно соблюдать, т.к. для каждого требования существует теоретическая предпосылка.

Инструкция требует, чтобы нивелирование I и II классов выполнялось в прямом и обратном направлениях, причем нивелирование I класса в каждом направлении прокладывается еще по двум парам костылей (левая и правая нивелировки) (рис. 13.3).

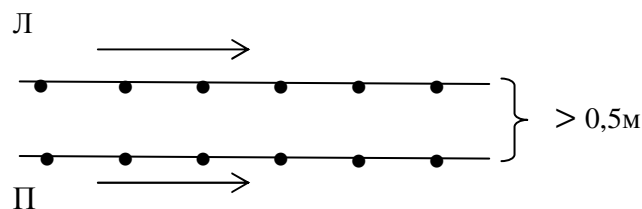


Рис. 13.3. Схема нивелирования I класса по двум парам костылей:

Л – левая нивелировка, П – правая нивелировка

Наблюдения при высокоточном нивелировании следует выполнять только при благоприятных условиях видимости, достаточно отчетливых и спокойных изображениях. Запрещается выполнять нивелирование при плавающих изображениях, сильном или порывистом ветре, сильных или скачкообразных изменениях температуры воздуха (более 6°C в час). С целью уменьшения влияния рефракции, а также погрешностей отсчитывания необходимо строго соблюдать требования на максимальную длину плеча и высоту визирного луча над подстилающей поверхностью (см. табл. 11.1). В летние месяцы и ясную погоду нивелирование следует выполнять в часы утренней и вечерней видимости. С меньшей строгостью это требование можно соблюдать ранней весной и осенью, при пасмурной погоде и в районах, расположенных севернее широты 62° .

При нивелировании в прямом ходе порядок наблюдений на станции следующий:

	Нечетная станция	Четная станция
1	Отсчет по основной шкале задней рейки	Отсчет по основной шкале передней рейки
2	Отсчет по основной шкале передней рейки	Отсчет по основной шкале задней рейки
3	Отсчет по дополнительной шкале передней рейки	Отсчет по дополнительной шкале задней рейки
4	Отсчет по дополнительной шкале задней рейки	Отсчет по дополнительной шкале передней рейки

В обратном ходе наоборот: на первой станции наблюдение выполняется по методике четной станции, на второй – по методике нечетной и т.д. Кроме того, при переходе от прямого хода к обратному рейки меняют местами.

При нивелировании I класса на каждой станции вначале берут все отсчеты по правой нивелировке, затем – по левой.

Лекция 14

ПОЛЕВЫЕ КОНТРОЛИ ПРИ ВЫСОКОТОЧНОМ НИВЕЛИРОВАНИИ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

14.1. Полевые контроли при высокоточном нивелировании

Результаты нивелирования контролируют на каждой станции, по секциям между смежными реперами, по полигонам и по участкам между фундаментальными реперами.

Контроли на станции в первом (втором) классе

1. Превышения, вычисленные по дальномерным нитям, не должны отличаться от измеренных превышений больше чем на 50 делений барабана, т.е. на 2,5 мм (в нивелировании 2 класса контроля нет).

2. Разность плеч допускается не более 0,5 м (1,0 м), накопление разностей плеч не более 1,0 м (2,0 м).

3. Разность превышений между основной и дополнительной шкалами как в левой, так и в правой нивелировками допускается не более 10 делений барабана или 0,5 мм (14 делений барабана или 0,7 мм).

4. Накопления разностей превышений между основной и дополнительной шкалами не должно превышать 14 делений барабана или 0,7 мм (20 делений барабана или 1,0 мм).

Контроли по секции

I класс:

$$d_1 = (h_{\text{лев.}} - h_{\text{прав.}})_{\text{прямо}} \leq 2 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}} \quad (\text{при } n \leq 15 \text{ на } 1 \text{ км хода});$$

$$d_2 = (h_{\text{лев.}} - h_{\text{прав.}})_{\text{обр.}} \leq 2 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}} \quad (\text{при } n \leq 15 \text{ на } 1 \text{ км хода});$$

$$\leq 3 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}} \quad (\text{при } n > 15 \text{ на } 1 \text{ км хода});$$

$$d_6 = (h_{\text{прямо}} - h_{\text{обр.}})_{\text{ср.}} \leq 3 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}} \quad (\text{при } n \leq 15 \text{ на } 1 \text{ км хода});$$

$$\leq 4 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}} \quad (\text{при } n > 15 \text{ на } 1 \text{ км хода}).$$

II класс:

$$(h_{\text{прямо}} - h_{\text{обр.}}) \leq 5 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}} \quad (\text{при } n \leq 15 \text{ на } 1 \text{ км хода});$$

$$\leq 6 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}} \quad (\text{при } n > 15 \text{ на } 1 \text{ км хода}).$$

14.2. Предварительная обработка результатов высокоточного нивелирования. Оценка точности

Целью предварительной обработки является проверка и контроль результатов полевых измерений, введение необходимых поправок в измеренные превышения и подготовка к уравниванию.

В измеренные превышения вводят следующие поправки:

1. Поправка за отличие средней длины метра комплекта реек от номинала δh_3

$$\delta h_3 = \Delta l_3 \cdot h', \quad (14.1)$$

$$h = h' + \delta h_3, \quad (14.2)$$

где $\Delta l_3 = (l - 1\,000,000 \text{ мм})$ – отклонение средней длины метра комплекта реек от номинала;

h' – измеренное превышение;

h – исправленное превышение.

2. Поправка за температуру δh_t вводится по формулам (13.4) или (13.5).

3. Поправка за переход к разностям нормальных высот δ_γ вычисляется в каждое превышение по секции:

$$\delta_\gamma = -\frac{1}{\gamma_m} (\gamma_{ok} - \gamma_{oi}) H_m + \frac{1}{\gamma_m} (g - \gamma)_m h_{ik}, \quad (14.3)$$

где γ_m – приближенное значение нормальной силы тяжести, принимаемое для территории России и Беларуси равное 980 000 мГал;

γ_{ok} и γ_{oi} – значения нормальной силы тяжести на отсчетном эллипсоиде в точках i и k ;

H_m – средняя высота пунктов i и k ;

$(g - \gamma)_m$ – среднее значение аномалии силы тяжести на конечных пунктах секции;

h_{ik} – превышение по секции.

Исправленное превышение вычисляется по формуле

$$h = h' + \delta h_3 + \delta h_t + \delta_\gamma, \quad (14.4)$$

где h и h' – исправленное и измеренное превышения по секции.

Контроль результатов нивелирования по невязкам полигонов $f_{пол.}$ и линий $f_{л.}$ выполняется по исправленным перечисленными поправками превышениям. Невязки полигонов и линий вычисляются по формулам:

$$f_{пол.} = \sum h_i, \quad (14.5)$$

$$f_{л.} = \sum h_i - (H_B - H_A), \quad (14.6)$$

где H_B и H_A – исходные отметки конечных пунктов линии.

Вычисленные невязки не должны превышать установленных допусков:

▪ I класс: $f \leq 3_{\text{мм}} \sqrt{L_{\text{км}}}$; (14.7)

▪ II класс: $f \leq 5_{\text{мм}} \sqrt{L_{\text{км}}}$. (14.8)

Оценка точности результатов нивелирования

Общая средняя квадратическая ошибка превышения между точками оцениваемого хода вычисляется по формуле

$$m = \sqrt{\eta^2 L + \sigma^2 L^2}, \quad (14.9)$$

где η и σ – соответственно случайная и систематическая ошибки нивелирования по ходу длиной L , мм/км.

Указанные ошибки вычисляются по формулам:

▪ I класс:

$$\eta^2 = \frac{1}{4n} \sum_1^n \frac{d_{5i}^2}{r_i} \quad \text{или} \quad \eta^2 = \frac{1}{4n} \sum_1^n \frac{d_{6i}^2}{r_i}, \quad (14.10)$$

$$d_5 = \frac{1}{2}(h_{\text{пр.}} + h_{\text{обр.}})_{\text{Л}} - \frac{1}{2}(h_{\text{пр.}} + h_{\text{обр.}})_{\text{П}}, \quad (14.11)$$

$$d_6 = \frac{1}{2}(h_{\text{П}} + h_{\text{Л}})_{\text{пр.}} - \frac{1}{2}(h_{\text{П}} + h_{\text{Л}})_{\text{обр.}}, \quad (14.12)$$

где n – число секций в оцениваемой линии (ходе);

r_i – длина нивелирной секции;

$h_{\text{пр.}}, h_{\text{обр.}}$ – превышение по секции, соответственно, прямое и обратное;

$h_{\text{П}}, h_{\text{Л}}$ – правое и левое превышение по секции;

▪ II класс:

$$\eta^2 = \frac{1}{8n} \sum_1^n \frac{d_i^2}{r_i}, \quad (14.13)$$

где $d = h_{\text{пр.}} - h_{\text{обр.}}$. (14.14)

Среднюю квадратическую систематическую ошибку σ среднего превышения на 1 км нивелирного хода I и II класса вычисляют по формуле

$$\sigma^2 = \frac{1}{4[L_j]} \left[\frac{S_j^2}{L_j} \right], \quad (14.15)$$

где $[L_j]$ – общая длина оцениваемой линии.

Значения S_j и L_j определяют по графику, который строят следующим образом. По оси абсцисс (рис. 14.1) откладывают в масштабе длины секций r_i , образующих нивелирную линию, а по оси ординат – накопления разностей d_6 по секциям, т.е. суммы $\Delta_i = \sum_1^n d_6^i$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). Затем ломаную кривую, проведенную по полученным точкам, разбивают на участки L_j с однообразным накоплением разностей, которые аппроксимируют прямыми линиями, показанными пунктиром. С графика снимают длины участков с однообразным накоплением разностей, а также разности S_j ординат концов участков, значения которых и используют в формуле (14.15).

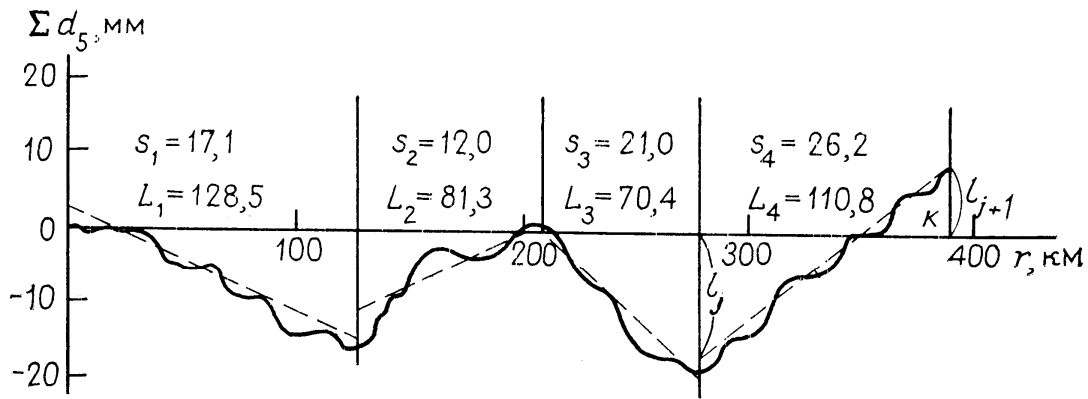


Рис. 14.1. График накопления систематических ошибок измерений при высокоточном нивелировании

Точность определения превышений в нивелирной сети I и II классов характеризуется, соответственно, следующими СКО:

$$\eta_I \leq 0,5 \text{ мм/км}, \sigma_I \leq 0,05 \text{ мм/км}; \eta_{II} \leq 1,2 \text{ мм/км}, \sigma_{II} \leq 0,2 \text{ мм/км}.$$

Суммарное влияние случайных и систематических ошибок на 1 км хода можно вычислить по невязкам замкнутых полигонов, используя формулу

$$m_h = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{f^2}{P} \right]}, \quad (14.16)$$

где N – число полигонов;
 f – их невязки;
 P – периметры полигонов, км.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ ШТРИХОВ ШКАЛ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОМЕТРА

Перед каждым отсчетом по шкале оптического микрометра производится совмещение изображений штрихов шкал лимба. От точности совмещения этих штрихов зависит и точность отсчета по шкале микрометра. Надо заметить, что поскольку изображения штрихов совмещаются на глаз, то погрешности совмещения будут выражать не только степень правильности работы микрометра, но и личные погрешности наблюдателя. Поэтому перед исследованиями необходима предварительная тренировка.

Исследование сводится к нахождению разности отсчетов при двукратном совмещении одних и тех же штрихов. Работу микрометра следует исследовать по всей его рабочей части. Чтобы исключить влияние мертвого хода, надо совмещение штрихов делать только поворотом барабана микрометра по ходу часовой стрелки.

Для исследования горизонтального круга алидаду устанавливают через 15^0 на отсчетах 0, 15, 30, ..., 330, 345^0 , всего 24 установки. После каждой установки перемещают шкалу микрометра для теодолита ОТ02 через $\frac{60^0}{24} = 2,5^0$, т.е. дают отсчеты 0; 2,5; 5,0, 7,5 ..., 55,0, $57,5^0$; для теодолита

ОТ1 через $\frac{300''}{24} = 12,5''$; для теодолита ЗТ2КП – через $\frac{600''}{24} = 25''$;

Порядок одной установки следующий:

1. Барабаном устанавливают на шкале микрометра рассчитанный отсчет в делениях.

2. Вращением алидады от руки, а затем наводящим ее винтом устанавливают на горизонтальном круге отсчет, кратный $15^000'$, совмещая штрихи шкал, близкие к индексу.

3. Повернув барабан несколько на себя, затем, вращая его только по ходу часовой стрелки, дважды совмещают штрихи и каждый раз берут отсчет I, II. Для каждой установки находят разность отсчетов $d = I - II$, а потом вычисляют среднюю квадратическую ошибку одного совмещения, которая не должна превышать $\pm 0,3''$ для теодолитов ОТ02, ОТ1 и $\pm 0,5''$ для теодолита ЗТ2КП (табл. 1), по формуле

$$m = \pm \sqrt{\frac{[d^2]}{2n}}$$

Определение погрешностей совмещения штрихов

Оптический теодолит ОТ-02 № 9529
6 октября 2007 г.

Установка алидады	Отсчеты по микрометру		$d = I - II$	Установка алидады	Отсчеты по микрометру		$d = I - II$
	I совмещение	II совмещение			I совмещение	II совмещение	
Горизонтальный круг							
0°	0,4 [∅]	0,5 [∅]	- 0,1 [∅]	180°	30,1 [∅]	30,1 [']	0,0 [∅]
15	2,7	2,9	- 0,2	195	32,8	32,6	+0,2
30	4,9	5,0	- 0,1	210	35,1	35,3	- 0,2
45	7,4	7,2	+0,2	225	37,5	37,6	- 0,1
60	10,2	10,3	- 0,1	240	39,9	40,0	- 0,1
75	12,3	12,3	0,0	255	42,6	42,8	- 0,2
90	15,1	15,2	- 0,1	270	45,1	45,0	+0,1
105	16,8	16,7	+0,1	285	47,3	47,3	0,0
120	20,2	20,2	0,0	300	50,2	50,3	- 0,1
135	22,5	22,5	0,0	315	52,4	52,3	+0,1
150	25,0	25,0	- 0,3	330	55,2	54,9	+0,3
165	27,3	27,6	- 0,3		57,6	57,7	- 0,1
							$[dd] = 0,58$

Средняя квадратическая погрешность одного совмещения

$$m_{\text{сop}} = \sqrt{\frac{[dd]}{2n}} = \sqrt{\frac{0,58}{48}} \approx \pm 0,11^{\circ} = \pm 0,22 < \pm 0,3''.$$

Наблюдал: *А. В. Петров*

Записывал *Н.П. Васильев*

Лабораторная работа № 2

НАБЛЮДЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПО СПОСОБУ КРУГОВЫХ ПРИЕМОВ

Способ круговых приемов предложен в первой половине XIX века русским военным геодезистом В.Я. Струве. Суть способа заключается в том, что при неподвижном лимбе теодолита, вращая алидаду по ходу часовой стрелки, последовательно наводят зрительную трубу на все визирные цели наблюдаемых направлений от первого (начального) к последнему и производят отсчеты по лимбу горизонтального круга и оптическому микрометру. Заканчивают круг наблюдений повторным наведением зрительной трубы на начальное направление, снова производят отсчет. Этот комплекс измерений составляет первый полуприем. Затем переводят трубу через зенит и, вращая алидаду против хода часовой стрелки, наводят трубу на 1, 4, 3, 2 и снова 1 направления. Эта серия наблюдений составляет второй полуприем. Два полуприема составляют один круговой прием.

Повторное наведение в каждом полуприеме на начальное направление с фиксированием отсчетов называется замыканием горизонта. Замыкание горизонта позволяет контролировать неподвижность лимба и отсутствие кручения знака в течение полуприема. В процессе наблюдений необходимо помнить, что в каждом полуприеме алидаду вращают только в одном направлении: в первом полуприеме (при круге лево) по ходу часовой стрелки, во втором (при круге право) – только в обратном направлении. При приближенном наведении трубы на визирную цель обратные движения алидады не разрешаются. Если труба окажется переведенной через визирную цель, то необходимо алидаду повернуть на полный оборот по ходу вращения ее в данном полуприеме.

Перед началом наблюдений на пункте составляется таблица рабочих установок лимба. Инструкцией в зависимости от класса триангуляции и типа применяемого теодолита установлено определенное число приемов наблюдений (табл. 1).

Таблица 1

Число приемов при наблюдении на пунктах триангуляции

Типы применяемых теодолитов	Число приемов на пунктах классов		
	2	3	4
T 0,5	12	9	4
T1, OT-02M, OT-02	12*	9	6
ЗТ2КП	–	12	6

* Если наблюдения в триангуляции 2 класса выполняются теодолитом OT 02 без поверительной трубы со сложных сигналов, то число приемов увеличивается до 15

Угол перестановки лимба между приемами можно рассчитать по формуле

$$\sigma = \frac{180}{m} + i(\text{или } \frac{i}{2}),$$

где m – число приемов;

i – цена деления лимба.

Затем составляется программа наблюдений на пункте, т.е. таблица рабочих установок лимба.

Примеры.

1. На пункте Березовка триангуляции 3 класса теодолитом ОТ-02 необходимо выполнить наблюдения. Угол перестановки лимба между приемами вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{180}{9} + 4' = 20^{\circ}04'.$$

Программу наблюдений на пункте Березовка можно представить в виде табл. 2.

Таблица 2
Программа наблюдений на пункте *Березовка* Теодолит ОТ 02

№ приемов	Названия направлений				
	Боровое	Круглое	Пертовка	Сосновка	Клюквенка
I	0°00*	57°43'*	104°12'*	198°09'*	301°37'*
II	20 04	77 47	124 16	218 13	321 41
III	40 08	97 51	144 20	238 17	341 45
IV	60 12	117 55	164 24	258 21	1 49
V	80 16	137 59	184 28	278 25	21 53
VI	100 20	158 03	204 32	298 29	41 57
VII	120 24	178 07	224 36	318 33	62 01
VIII	140 28	198 11	244 40	338 37	82 05
IX	16 32	218 15	264 44	358 41	102 09

* Значения направлений, измеренных на пункте Березовка, до начала наблюдений с точностью до минуты

Если на этом же пункте Березовка (3 класс) наблюдения будут выполняться теодолитом ЗТ2КП, то угол перестановки лимба между приемами должен быть $15^{\circ}10'$. Программа наблюдения для этого случая рассчитывается так же, как показано в табл. 2.

2. На пункте триангуляции Ельня должны быть выполнены наблюдения по программе 2 класса теодолитом ОТ-02М без поверительной трубы. Программа рабочих установок лимба для этого случая дается в табл. 3, $\sigma = 12^{\circ}05'$.

Система установок лимба, рассчитанных для каждого приема, способствует максимальному ослаблению влияния погрешности штрихов лимба на результаты угловых измерений. Рабочие установки на все другие направления, кроме начального, позволяют наблюдателю во время работы быстро найти нужный объект визирования. Точность установки лимба должна быть не ниже 2 – 3'.

Таблица 3
Теодолит ОТ 01

Программа наблюдений на пункте Ельня

№ приемов	Название направлений			
	Чертаново	Занино	Сокольники	Храброе
I	0°00′	32°42′	107°00′	190°24′
II	12 05	44 47	119 05	202 29
III	24 10	56 52	131 10	214 34
IV	36 15	68 57	143 15	326 39
V
VI	132 55	165 37	239 55	323 19
VII	145 00	177 42	252 00	335 24
VIII	157 05	189 47	264 05	347 29
IX	169 10	201 52	276 10	359 34

Порядок работы на пункте. Работа на пункте начинается с выполнения подготовительных процессов. Для этого перед началом наблюдений на пункте необходимо: соблюдая правила по технике безопасности, поднять теодолит на сигнал, установить его на столике сигнала не менее чем за полчаса до начала наблюдений, чтобы он принял температуру окружающей среды. Теодолит защищают от воздействия солнечных лучей и ветра. Устраняют все обнаруженные дефекты сигнала. Приводят теодолит в рабочее положение. Затем уточняют полученную схему триангуляции, отыскивая направления, подлежащие наблюдению с данного пункта. Одновременно выполняют измерение горизонтальных направлений и зенитных расстояний с точностью до минут. Данные измерений горизонтальных направлений используют при составлении программы наблюдений. По отсчетам вертикального круга, т.е. по измеренным зенитным расстояниям, определяют, в какие направления необходимо вводить поправки за наклон оси вращения инструмента. Эта поправка вводится в те направления, зенитные расстояния которых отличаются от 90^0 на величину более 2^0 .

Найдя направления, подлежащие наблюдению, и изучив условия видимости и прохождения визирного луча по всем направлениям, решают вопрос о выборе начального направления.

На пункте, имеющем направления 2, 3 и 4 классов, наблюдения выполняют отдельно по самостоятельной программе для направлений каждого класса. При этом в программу наблюдений включают направления дан-

ного класса и для связи направления на 1 – 2 пункта высшего класса, имеющих наилучшую видимость. Начальным для всех групп на данном пункте берут, как правило, одно и то же направление.

Если на пункте много направлений какого-либо класса (9 и более) или отсутствует одновременная видимость по всем направлениям, то целесообразно разделить направления на две группы. Разбивку направлений на группы необходимо выполнять так, чтобы последнее направление одной группы было начальным для другой. При этом на пункте возникает условие горизонта. Связь смежных групп в этом случае осуществляется через общие направления, которыми являются последние направления групп.

Например, когда на пункте 9 направлений, разбивку последних на группы с учетом конкретных условий видимости можно сделать следующим образом:

Вариант	1-я группа	2-я группа
I	1, 2, 3, 4, 5	5, 6, 7, 8, 9, 1
II	1, 2, 3, 4, 5, 6	6, 7, 8, 9, 1

Дополнительным контролем наблюдений в этом случае является условие горизонта, невязка (свободный член) которого не должна превышать величины $3m$, где m – средняя квадратическая погрешность измеренного угла для данного класса.

Отдельный прием измерения направлений способом круговых приемов состоит из следующих операций.

1. Наводят биссектор зрительной трубы на визирную цель начального направления, устанавливают на лимбе отсчет, соответствующий тому, который указан в таблице для данного приема. Для этого с помощью головки шестерни лимба совмещают изображения противоположных штрихов лимба. Для первого приема, например, совмещают штрихи $0^{\circ}00'$ и $180^{\circ}00'$. При этом отсчет на шкале секунд оптического микрометра для первого приема должен быть близким к нулю. В последующих приемах при очередной установке лимба рекомендуется менять отсчет на шкале секунд на 5 – 10 делений. Затем перед началом первого полуприема необходимо дать алидаде 1 – 2 свободных оборота в направлении ее последующего движения. Обычно в полуприеме, выполняемом при круге лево, алидаду вращают по ходу часовой стрелки, при круге право – против хода часовой стрелки. После этого наводят трубу на начальное направление, заканчивая наведение биссектора на изображение визирной цели микрометрическим винтом алидады при закрепленном зажимном винте. Затем дважды точно совмещают противоположные штрихи лимба барабаном оптического мик-

рометра и после каждого совмещения делают отсчет: после первого совмещения – по лимбу и шкале микрометра, после второго – только по шкале микрометра.

2. После этого, открепив зажимной винт алидады и вращая ее в заданном в начале полуприема направлении, наводят биссектор на очередной пункт, не забывая при этом окончательное наведение выполнять ввинчиванием микрометричного винта алидады.

Барabanом оптического микрометра дважды совмещают изображения противоположных штрихов лимба и дважды делают необходимые отсчеты по лимбу и оптическому микрометру.

Аналогичным образом выполняют наблюдения на все последующие направления.

3. Первый полуприем заканчивают повторным наведением на начальное направление и производством отсчетов, как указано в п. 1. Полученные значения отсчетов на начальное направление в начале и в конце полуприема не должны расходиться между собой более чем на 6" для ОТ-02 и равноточных ему инструментов и на 8" для Т2 и ему равноточных. Если незамыкание горизонта в полуприеме получится выше указанного допуска, то прием переделывают на той же установке лимба.

4. Перед началом второго полуприема переводят трубу через зенит, открепляют зажимной винт алидады и, оставляя лимб неподвижным, дают ей 1 – 2 свободных оборота против хода часовой стрелки. Затем наводят биссектор на начальное направление и берут отсчеты в той же последовательности. Далее наблюдают все остальные пункты (направления), но в обратном порядке 1, 4, 3, 2, 1.

Результаты измерений горизонтальных направлений способом круговых приемов записывают в журнале установленной формы (табл. 4).

Обработка журнала. Начинается обработка журнала в процессе наблюдений и выполняется помощником наблюдателя.

В графы 3, 4 и 5 записывают отсчеты по лимбу и оптическому микрометру. В графе 6 по каждому направлению при каждом круге выводят среднее из отсчетов по микрометру (для ОТ-02 таким средним является сумма отсчетов по микрометру). По окончании каждого полуприема вычисляют значения незамыкания горизонта при круге лево и круге право, т.е. Δ_L , Δ_P и $\frac{\Delta_L + \Delta_P}{2} = \Delta_{cp}$. Если Δ_L или Δ_P будут превышать допуск, то дальнейшее наблюдение и обработку такого приема прекращают. Прием аккуратно зачеркивают и в журнале делают примечание – причины исключения приема. Забракованный прием наблюдают снова на той же установке.

**Журнал измерения горизонтальных направлений круговыми приемами
на пункте триангуляции 3 класса
Теодолит ОТ-02**

Пункт – *Березовка*

Прием IV

Дата 22. IX. 2007 г.

 $t^{\circ} = +16^{\circ}$ Погода – *облачная, ветер – слабый*

Время 16 ч 37 мин.

Видимость – *удовлетв.*Изображение – *слегка колеблющееся*

Название направления	Круг	Отсчет по шприхам лимба	Отсчет по микрометру		$\frac{a_1 + a_2}{2}$	$L - P$ (2C)	$\frac{L + P}{2}$	Значение направления
			a_1	a_2	или $\frac{a_1 + a_2}{2}$ *			
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
Боровое	Л	60 ⁰ 12 ⁷	34,3	34,5	13 08,8	+7,0	13 ⁰ 05,3 ³	0 ⁰ 00 ⁰ 00,0 ⁰
	П	240 12	31,0	30,8	01,8			
Круглое	Л	117 56	23,1	22,8	56 45,9	+6,1	56 42,8	57 43 37,2
	П	297 56	20,0	19,8	39,8		-0,3	
Петровка	Л	164 24	58,2	58,2	25 56,4	+1,5	25 55,6	104 12 49,7
	П	344 24	57,3	57,6	54,9		-0,6	
Сосновка	Л	258 22	04,6	04,7	22 09,3	+3,8	22 07,4	198 09 01,2
	П	78 22	02,8	02,7	05,5		-0,9	
Клюквенка	Л	1 50	15,0	15,3	50 30,3	-0,8	50 30,7	301 37 24,2
	П	181 50	15,5	15,6	31,1		-1,2	
Боровое	Л	60 12	33,9	34,0	13 07,9	+2,4	13 06,7	–
	П	240 12	32,8	32,7	05,5		-1,4	
Незамыкание $\Delta_L = -0,9''$; $\Delta_P = +3,7''$; $\Delta_{cp} = +1,4''$								
Замечания – наибольшее $\Delta_{(L-P)} = -7,0''$								

* $a_1 + a_2$ – для теодолита ОТ-02

Затем вычисляют по каждому направлению двойную коллимационную ошибку $2C = L - P$, где L и P – значения направления соответственно при круге лево и круге право. Полученные $2C$ вписывают в графу 7 против соответствующих им направлений. Колебания $2C$ в приеме не должны превышать 8" для ОТ-02, ОТ-02М и Т1 и 10" для Т2 и равноточных ему теодолитов. В горных районах, где зенитные расстояния значительно отличаются от 90^0 , колебания $2C$ допускаются соответственно в пределах 12" и 14". Если колебание $2C$ в приеме превысит допустимую величину, то наблюдения такого приема прекращают и сразу же повторяют на той же установке. Если недопустимое колебание $2C$ обнаружено после окончания приема или всей программы, недоброкачественный прием также подлежит переделке на той же установке. Неоконченные приемы из-за недопустимой величины замыкания горизонта или колебания $2C$ и переделанные на тех

же установках в подсчете переделок (в % повторных измерений) не учитывают. В связи с этим при обработке журнала наблюдений желательнее, чтобы помощник успевал по ходу наблюдений производить вычисления граф 6 и 7 и своевременно выявлял недопустимость величин Δ_L , Δ_{II} и $2C$. Тогда переделка недоброкачественных приемов должна выполняться сразу же по ходу наблюдений. В противном случае переделка таких приемов должна производиться в конце программы наблюдений.

Затем вычисляют средние значения каждого направления из полученных величин этого направления в полуприемах и записывают их в графу 8. Для начального направления среднее значение получается дважды в начале и в конце полуприема (в нашем примере 13'05,3" и 13'06,7"). Разность их равна среднему значению незамыкания горизонта Δ_{cp} . Эту невязку за незамыкание горизонта распределяют пропорционально порядковому номеру направлений по формуле

$$\delta_k = \frac{-\Delta_{cp}}{n}(k-1),$$

где δ_k – поправка в направление;

n – число наблюдаемых направлений;

k – порядковый номер наблюдаемого направления.

Вычисленные поправки δ_k в каждое направление записывают в графу 8 под средним значением соответствующего поправке направления. Знак поправки δ_k всегда противоположный знаку Δ_{cp} .

Окончательные значения приведенных к нулю направлений для данного приема получают путем вычитания среднего значения начального направления (в примере 13'05,3") из среднего значения каждого направления с учетом поправки δ_k . Эти данные записывают в графе 9.

Вычисление значений измеренных направлений в отдельных приемах на пунктах триангуляции всех классов производят с точностью до 0, Г'.

Результаты угловых измерений, выполненных способом круговых приемов, должны удовлетворять допускам, приведенным в табл. 5.

Все законченные приемы основной программы, не удовлетворяющие указанным выше допускам, считаются недоброкачественными и подлежат повторному наблюдению. Выбраковка приемов и приемонаправлений является ответственным моментом при выполнении повторных измерений. При этом необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. Повторные измерения следует выполнять только после окончания наблюдений основной программы и тщательного контроля всех вычислений в приемах.

Допуски при измерении направлений на пунктах триангуляции 2, 3 и 4 классов

Вид допуска	Типы теодолитов	
	T1, OT-02, OT-02M	ЗТ2КП
Расхождение между результатами наблюдений на начальное направление в начале и конце полуприема (замыкание горизонта)	6"	8"
Колебание направлений в отдельных приемах, приведенных к начальному направлению	6	8

2. Приемы, в которых значительное число результатов направлений не удовлетворяет требованиям инструкции, переделывают полностью. Приемы, в которых 1 – 2 направления подлежат перенаблюдениям, можно переделывать не полностью. При этом требующее перенаблюдения направление связывают с начальным и двумя смежными направлениями во 2 классе и с начальным и одним смежным направлением в 3 и 4 классах. Аналогичным образом производят наблюдения пропущенных из-за плохой видимости направлений при выполнении основной программы.

3. Если из всего ряда наблюдений результаты двух приемов недопустимо отличаются один от другого и от результатов остальных приемов уклоняются в разные стороны на сравнительно большую величину, то рекомендуется повторять оба приема как с максимальным, так и с минимальными значениями направлений.

4. Прием, результаты направлений которого значительно уклоняются от результатов остальных приемов, переделывают как грубо измеренный.

5. Повторные измерения приемов выполняют на прежних установках лимба. Если значение выполненного повторно приема не удовлетворяет требованиям допуска, то такой прием рекомендуется повторять вторично. Вторичное бисирование приема выполняют на измененной установке лимба – на установке смежного приема.

6. На пункте к перенаблюдениям допускается не более 30 % всех приема-направлений; в противном случае наблюдения выполняют заново.

Наблюдения на пункте считаются завершенными только после окончания основной программы и перенаблюдения недоброкачественных приемов и выполнения тщательного контроля всех вычислений, сделанных в журнале.

Лабораторная работа № 3
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ
В СПОСОБЕ КРУГОВЫХ ПРИЕМОМ

Таблица 1

Триангуляция 3 класса 1973 год

Сводка результатов наблюдений горизонтальных направлений и зенитных расстояний на пункте Березовка № 215

Наблюдатель – Валишев В.

Тип знака – простой сигнал

Инструмент – Т2 № 105313

Журнал № 2

Наблюдения выполнены с 6 по 7. 05. 2007 г.

Чертеж направлений	№ направ- лений	Название направлений	Уравнение на станции направления 0' / "	$(c'' + r'')$ "	Приведенные к центру на- правления 0' / "	Число на- правлений и приемов, вес направления, СКО
	1	Боровое	0 00 00,0			$n = 5$
	2	Круглое	57 43 36,1			$m = 12$
	3	Петровка	104 12 52,5			
	4	Сосновка	198 09 04,3			
	5	Клюквенка	301 37 23,7			
	Ориентирный пункт 1	93 07 17				$\mu = \pm 1,76''$
	Ориентирный пункт 2	264 48 49				$M = \pm 0,51''$
						$d_1 = 426\text{м}$
						$d_1 = 743\text{м}$

Вывод средних направлений на пункте Березовка

Начальное направление Боровое 0°00'00 00"

Дата наблюдений	№ приема	Установка лимба	Круглое		Петровка		Сосновка		Клюквенка		Наибольшие	
			0 / "	v	0 / "	v	0 / "	v	0 / "	v	замыкания	колебания (Л - П)
6.05.1973	I	0°00'	57 43		104 12		198 09		301 37			
	-//- II	15 10	33,7	-2,4	52,1	-0,4	04,8	+0,5	21,9	-1,8	-0,9	6,4
	-//- III	30 20	33,8	-2,3	49,8	-2,7	04,6	+0,3	23,2	-0,5	-0,8	8,0
	-//- IV	45 30	36,8	+0,7	50,5	-2,0	04,0	-0,3	25,0	+1,3	+2,1	5,1
	-//- V	60 40	39,2	+3,1	51,0	-1,5	03,2	-1,1	25,3	+1,6	-1,0	6,6
	-//- VI	75 50	35,7	-0,4	55,8	+3,3	08,6		19,2		-2,6	4,0
	-//- VII	91 00	38,6	+2,5	54,5	+20,0	06,4	+2,1	27,1	+3,4	-4,8	5,3
7.05.1973	VIII	106 10	38,0	+1,9	53,5	+1,0	05,8	+1,5	24,8	+1,1	-2,0	7,6
	-//- IX	121 20	36,9	+0,8	55,7	+3,2	03,6	-0,7	22,9	-0,8	2,0	3,3
	-//- X	136 30	37,7	+1,6	53,4	+0,9	07,9		25,7		+4,6	5,7
	-//- XI	151 40	34,2	-1,9	51,7	-0,8	04,9	+0,6	24,6	+0,9	-5,1	4,9
	-//- XII	166 50	36,0	-0,1	53,6	+1,1	05,5	+1,2	23,4	-0,3	+3,6	6,0
	Y		32,1	-4,0	48,3	-4,2	02,7	-1,6	20,9	-2,8	-1,2	7,2
	IX						00,9	-3,4	(19,6)	-4,3	-2,3	3,7
Y						05,3	+1,0	(26,3)	+2,3	+6,1	6,7	
IX								19,4				
								26,0				
	Среднее	Σ(+)	57 43 36,1	10,6	104 12 52,5	11,5	198 09 04,3	7,2	301 37 23,7	10,6		
		Σ(-)		11,1		11,6		7,1		10,5		Σ v =80,2

Окончание табл. 1

Группа ориентирных пунктов					Средняя квадратическая погрешность направлений из 1 приема $\mu = K \frac{[v]}{n}$; из m приемов $M = \frac{\mu}{\sqrt{m}}$, m – число приемов, n – число направлений.
№ приема	Боровое	Круглое	Ориентир- ный пункт 1	Ориентир- ный пункт 2	
I	0 ⁰ 00'00,0"	57 ⁰ 43'34,3"	93 ⁰ 07'16,1"	264 ⁰ 48'53,0"	Сводку составил: В. В. Валишев 10 мая 2007 г. Проверил: Н. Н. Арашин
II	00,0	38,4	21,6	47,4	
III	00,0	37,0	14,5	46,3	
Среднее	0 00 00,0	57 43 36,6	93 07 17	264 48 49	

Подсчитав средние значения всех направлений, вычисляют отклонения от них значений данного направления в каждом приеме с учетом знака v . Затем по каждому направлению подсчитывают суммы v с плюсом и минусом. При правильном вычислении среднего значения направления суммы положительных и отрицательных v для данного направления должны быть равны или отличаться за счет округлений в пределах $m: 2$ единиц последнего знака, где m – число приемов.

Оценку точности угловых измерений при применении способа круговых приемов производят по формулам:

- для вывода средней квадратической погрешности направления, измеренного одним приемом,

$$\mu = \pm K \frac{\sum |v|}{n};$$

- для средней квадратической погрешности уравненного на станции направления, выведенного из t приемов,

$$M = \pm \frac{\mu}{\sqrt{m}},$$

где $\sum |v|$ – сумма абсолютных значений отклонений измеренных направлений от их средних арифметических значений из всех приемов, взятых в обработку;

K – множитель при $m = 6, 9, 12$ или 15 равен соответственно $0,23, 0,15, 0,11$ или $0,09$;

n – число направлений;

m – число приемов.

Вычисленные средние (уравненные на станции) значения всех направлений и средние квадратические ошибки μ и M записывают на первой странице сводки. Здесь же записывают средние значения направлений на ориентирные пункты и дают ориентированный чертеж отнаблюдённых направлений.

Лабораторная работа № 4

НАБЛЮДЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УГЛОВ ПО СПОСОБУ ВСЕВОЗМОЖНЫХ КОМБИНАЦИЙ

Сущность способа заключается в том, что на пункте измеряют отдельные углы, образованные возможными комбинациями любой парой направлений, подлежащих наблюдению. При этом число измеряемых углов при n направлениях подсчитывают по формуле

$$\text{Число углов} = \frac{n(n-1)}{2}$$

Например, при четырех направлениях (рис. 1) на пункте измеряют шесть углов: (1.2), (1.3), (1.4), (2.3), (2.4) и (3.4). Каждый из этих углов измеряют определенным числом приемов, постоянным для всех углов на данном пункте. При этом все измеренные углы имеют равные веса. Нетрудно заметить (см. рис. 1), что значение каждого угла можно получить трижды: одно – непосредственно измеренное значение и два – как сумма или разность двух других непосредственно измеренных углов. Например, угол (1.2) = (1.3) – (2.3) = (1.4) – (2.4), (1.3) = (1.2) + (2.3) = (1.4) – (3.4), (1.4) = (1.2) + (2.4) = (1.3) + (3.4).

Степень доверия значениям углов, полученным из непосредственного измерения, выше, чем значениям тех же углов, полученным как сумма или разность двух других непосредственно измеренных углов.

Таким образом, после наблюдений появляется необходимость в уравнивании углов на станции. Уравненный на станции угол равен среднему арифметическому из ряда неравноточных его значений, полученных из его непосредственно измеренного значения с весом два и всех остальных значений, вычисленных как сумма или разность двух других непосредственно измеренных углов с весом один.

Полученные в результате уравнивания на станции вероятнейшие значения углов будут равноточны. Но веса этих вероятнейших значений углов зависят от числа наблюдаемых направлений и равны числу направлений, если углы измерялись одним приемом. Если углы измерены m приемами, то вес уравненного угла будет равен mn .

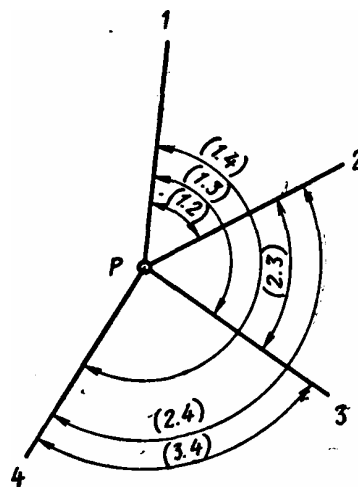


Рис. 1. Наблюдения по СВК

Однако, согласно требованию Инструкции, измерения в триангуляции необходимо выполнять так, чтобы веса уравненных на станции значений измеренных направлений были одинаковыми на всех пунктах. Для обеспечения этого требования необходимо, чтобы произведение числа направлений n на число приемов m для всех пунктов сети данного класса было бы величиной постоянной, т.е. $mn = P = \text{const}$.

Эта величина, называемая весом измерений, регламентирована инструкцией и зависит от класса триангуляции и типа применяемого инструмента. Например, для триангуляции 1 класса произведение mn принимается равным 36 или 35, для триангуляции 2 класса – 21, 24, 25 для теодолитов с поверительной трубой и 28, 30, 32 для теодолитов без поверительной трубы.

Пользуясь этими данными, по известным значениям P и n определяют число приемов m для измерения углов на данном пункте. Например, если на пункте 2 класса с четырьмя направлениями необходимо выполнить наблюдения теодолитом ОТ-02 (без поверительной трубы), то число приемов для случая, когда наблюдения выполняют с простых сигналов, подсчитывают по формуле

$$m = \frac{P}{n} = \frac{24}{4} = 6.$$

Если наблюдения выполняются со сложных сигналов тем же теодолитом без поверительной трубы, тогда m будет равно

$$m = \frac{P}{n} = \frac{28}{4} = 7.$$

Таким образом, число приемов для наблюдения углов на данном пункте в каждом конкретном случае определяют в зависимости от числа направлений (берут со схемы) и значения P (выбирают из инструкции).

В целях получения независимых результатов измерений углов и ослабления влияния погрешностей делений лимба углы измеряют на разных установках горизонтального круга. При этом каждое направление должно наблюдаться при одном и том же положении лимба, по возможности только один раз. Это достигается тем, что лимб при измерении каждого угла

между приемами переставляют на угол $\sigma = \frac{180^\circ}{m}$, а между группами не

примыкающих друг к другу углов – на угол $\delta = \frac{\sigma}{n-1}$ при n – четном числе

направлений и $\delta = \frac{\sigma}{n}$ при n – нечетном.

Для ослабления влияния короткопериодических погрешностей делений лимба к вычисленным значениям углов σ и δ , предварительно округленным до целого градуса, прибавляют угол i или $\frac{i}{2}$ где i – цена наименьшего деления лимба.

Приведенные выше формулы используют при составлении программы наблюдений на пункте.

Составление программы наблюдений начинают с расчета таблицы установок лимба для каждого угла и приема указанным выше методом (табл. 1)

Таблица 1

Таблица расчетных установок лимба $n = 4, m = 8$

Угол	Приемы							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1.2	0°00′	22°04′	45°08′	67°12′	90°16′	112°20′	135°24′	157°28′
1.3	8 04	30 08	53 12	75 16	98 20	120 24	143 28	165 32
1.4	15 08	37 12	60 16	82 20	105 24	127 28	150 32	172 36
2.3	15 08	37 12	16 16	82 20	105 24	127 28	150 32	172 36
2.4	8 04	30 08	53 12	75 16	98 20	120 24	143 28	165 32
3.4	0 00	22 04	45 08	67 12	90 16	112 20	135 24	157 28

При этом можно также воспользоваться таблицами расчетных установок лимба для любого случая, приведенными в инструкции.

Задача наблюдателя состоит в том, чтобы найти нужную таблицу установок лимба и, используя ее данные и значения измеренных до минут углов, составить таблицу так называемых рабочих установок лимба.

Порядок составления таблицы рабочих установок рассмотрим на примерах.

Пример 1. На пункте триангуляции 2 класса Ельня, имеющем четыре направления, оптическим теодолитом ОТ-02 без поверительной трубы со сложного сигнала должны быть выполнены наблюдения способом во всех комбинациях. В этом случае вес направления $P = mn = 32$, при $n = 4$ число приемов $m = \frac{32}{4} = 8$.

Угол перестановки лимба между приемами $\sigma = \frac{180^0}{8} + i = 22^030' + 4'$, а

угол $\delta = \frac{\sigma}{n-1} + i = 7^030' + 4'$.

Значения углов σ и δ округляют до целых градусов, в данном примере σ – до 22 и 23⁰ и δ – до 7 и 8⁰. В таблице установок (см. табл. 1) эти значе-

ния углов чередуются через установку. Таблицу рабочих установок лимба составляют в следующей последовательности.

1. В подготовленный бланк таблицы для всех углов, связанных с начальным направлением (1.2, 1.3, 1.4, 1.5 и т.д.) из инструкции или из таблицы расчетных установок лимба, составленной наблюдателем, выписать значения установок лимба для левого направления каждого угла.

2. Для углов, не связанных с начальным направлением (2.3, 2.4, 2.5, 3.4, 4.5 и т.д.), рабочие установки лимба рассчитывают путем прибавления к расчетной установке величины угла, составленного начальным направлением и левым направлением данного угла.

Для углов 2.3, 2.4, 2.5 прибавляют значение угла 1.2; для углов 3.4, 3.5 – 1.3 и т.д. При этом значения углов 1.2, 1.3, 1.4 целесообразно предварительно округлять до четных значений минут при составлении программы для теодолита ОТ-02, и кратных 5' – для теодолитов ОТ-02М, Т1.

В нашем примере углы $1.2 = 32^{\circ}43'$, $1.3 = 106^{\circ}59'$. После округления этих углов и прибавления их к соответствующим расчетным установкам лимба таблицу рабочих установок получим в следующем виде (табл. 2).

Для теодолитов с наименьшим делением лимба i – кратным 5' в таблице рабочих установок число минут установки должно быть кратным 5'.

Таблица 2

Таблица рабочих установок лимба $n = 4$, $m = 8$

Угол	Приемы							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1.2	0 ⁰⁰ '	22 ⁴⁰ '	45 ⁰⁸ '	67 ¹² '	90 ¹⁶ '	112 ²⁰ '	135 ²⁴ '	157 ²⁸ '
1.3	8 04	30 08	53 12	75 16	98 20	120 24	143 28	165 32
1.4	15 08	37 12	60 16	82 20	105 24	127 28	150 32	172 36
2.3	47 50	69 54	92 58	115 02	138 06	160 10	183 14	205 18
2.4	40 46	62 50	85 54	107 58	131 02	153 06	176 10	198 14
3.4	107 00	129 04	152 08	174 12	197 16	219 20	242 24	264 28

Пример 2. На пункте триангуляции 2 класса Занино, имеющем пять направлений, теодолитом ОТ-02М с поверительной трубой необходимо выполнить наблюдения способом измерения углов во всех комбинациях. Вес направления в этом случае равен 25. При $n = 5$ число приемов $m = 5$. По приведенным выше формулам рассчитывают величину углов σ и δ . Для данного случая угол перестановки лимба между приемами

$$\sigma = \frac{180}{m} + i = 36^{\circ}05'$$

величина угла, на которую переставляют лимб при пе-

реходе к измерению следующего угла, $\delta = \frac{36}{n} + i = 7^{\circ}05'$.

Измерив значения направлений (углов) с точностью до минут, приступают к составлению таблицы рабочих установок лимба. Пусть измеренные углы будут равны: $1.2=59^{\circ}03'$, $1.3 = 146^{\circ}14'$, $1.4=212^{\circ}49'$. Тогда таблица рабочих установок примет вид (табл. 3).

Таблица рабочих установок лимба, составленная до начала наблюдений, записывается в журнал наблюдений на специально отведенной для этой цели странице. Второй экземпляр этой таблицы во время наблюдений находится у наблюдателя, который пользуется им при установках лимба очередного приема.

Таблица 3

Таблица рабочих установок лимба на пункте Занино $n = 5, m = 5$

Угол	Приемы				
	I	II	III	IV	V
1.2	$0^{\circ}00'$	$36^{\circ}05'$	$72^{\circ}10'$	$108^{\circ}15'$	$144^{\circ}20'$
1.3	7 05	43 10	79 15	115 20	151 25
1.4	14 10	50 15	86 20	122 25	158 30
1.5	21 15	57 20	93 25	129 30	165 35
2.3	73 15	109 20	145 25	181 30	217 35
2.4	80 20	116 25	152 30	188 35	224 40
2.5	87 25	123 30	159 35	195 40	231 45
3.4	174 35	210 40	246 45	282 50	318 55
3.5	146 15	182 20	218 25	254 30	290 35
4.5	219 55	256 00	292 05	328 10	364 15

Перед началом наблюдений наблюдатель, отыскивая направления на смежные пункты, подлежащие наблюдению, выбирает начальное направление. Требования к выбору начального направления в основном те же, что и при способе круговых приемов. Однако если при способе круговых приемов за начальное направление на пункте 2 класса может быть принято направление на пункт любого класса, то при измерении углов во всех комбинациях за начальное направление берется направление на пункт только 2 класса триангуляции.

Порядок работы на пункте. В процессе исполнения программы наблюдатель должен руководствоваться основными требованиями и общими правилами угловых измерений. В зависимости от условий видимости намечается такой порядок наблюдений, который максимально позволит использовать наилучшую видимость по каждому направлению. Однако в течение одной видимости (утренней или вечерней) наблюдатель должен стремиться измерить максимальное количество разных углов. Категорически запрещается выполнять подряд измерение одного и того же угла всеми приемами. Если по какому-либо направлению видимость временно отсутствует, углы с

этим направлением можно пропускать, наблюдая остальные углы. При этом число приемов, в которых данный угол не наблюдался из-за отсутствия видимости, не должно быть более 50 % общего числа приемов.

Например, на пункте с четырьмя направлениями углы наблюдают шестью приемами. Видимость по направлению 3 временно отсутствует. В этом случае наблюдатель может измерять углы 1.2, 1.4 и 2.4 тремя приемами. После этого, если видимость по направлению 3 не появится, наблюдения прекращают до появления видимости.

Измерение отдельного угла является несложной операцией, но требует большой осторожности, внимания и определенного опыта.

Измерение угла одним приемом проводится в следующей последовательности.

Первый полуприем

Подготовив теодолит к наблюдениям, наводят биссектор зрительной трубы при *КЛ* на визирную цель левого предмета, по лимбу устанавливают отсчет, соответствующий установке данного угла для данного приема (берется из табл. рабочих установок). Затем, открепив алидаду и вращая ее по ходу часовой стрелки на 360^0 , снова наводят биссектор трубы на визирную цель левого предмета. Закрепив алидаду, микрометренным винтом, действуя на ввинчивание, точно вводят визирную цель в биссектор трубы. Головкой микрометра дважды совмещают изображения штрихов и берут отсчеты: после первого совмещения – по лимбу и оптическому микрометру, после второго – по оптическому микрометру. Далее, открепив алидаду и вращая ее по ходу часовой стрелки на величину измеряемого угла, наводят биссектор на визирную цель правого предмета и после двукратного совмещения штрихов производят отсчеты, как указано выше. На этом заканчивается первый полуприем.

Второй полуприем

Переводят трубу через зенит и, вращая алидаду по ходу часовой стрелки на 180^0 , наводят биссектор зрительной трубы на визирную цель правого предмета. После двукратного совмещения штрихов лимба дважды берут отсчеты. Затем, открепив алидаду и вращая ее по ходу часовой стрелки на величину дополнения измеряемого угла до 360^0 , наводят биссектор на визирную цель левого предмета, дважды совмещают изображения штрихов и берут отсчеты по лимбу и оптическому микрометру. Разность отсчетов по шкале оптического микрометра при двух совмещениях изображений штрихов лимба не должна превышать допусков, указанных для способа круговых приемов. На этом заканчивают измерение угла одним приемом.

Нетрудно заметить, что в процессе измерения угла полным приемом алидаду вращают только в одном направлении. Инструкцией рекомендуется половину программы наблюдать при вращении алидады по ходу часовой стрелки, вторую половину – против хода часовой стрелки. В практике наблюдений все углы нечетных приемов принято измерять вращением алидады по ходу часовой стрелки, четных приемов – против хода часовой стрелки.

Результаты измерения углов способом Шрейбера записывают в журнале установленной формы (табл. 4).

Таблица 4

Журнал измерения углов во всех комбинациях

Теодолит ОТ-02 Дата 15. IV. 2007г. 16 ч. 24 мин.

Погода – облачно, ветер – тихо, $t^0 = +15^0$,

Видимость – удовлетв.

Изображение спокойное

Угол, прием	Круг	№ направления, визирная цель	Отсчеты		Значения в полуприеме		Среднее значение угла
			по штрихам лимба	по шкале микрометра	направления	угла	
1	2	3	4	5	6	7	8
	Л	1 в.ц.*	14°08′	12,7			
				12,3	08′25,0"	48′57,0"	
1,4		4 в.ц.	226 56	40,9			
				41,1	57 22,0		212°48′55,4"
1	П	4	46 56	41,9			
				41,7	57 23,6		
		1	194 08	15,0		48 53,7	
				14,9	08 29,9		
							$\Delta_{Л-П} = +3,3''$

* в. ц. – визирная цель

Обработка результатов угловых измерений ведется в журнале в процессе наблюдений помощником. В графе 1 (см. табл. 4) записывают наименование измеряемого угла и № приема. В графе 3 указывают № направления и характеристику визирной цели. В графе 4 и 5 записывают отсчеты по лимбу и оптическому микрометру. В графах 6 и 7 записывают значения в полуприеме направлений и угла, вычисленных по результатам наблюдений. В графе 8 дается среднее значение угла, выведенное из двух полуприемов. В конце приема для контроля выписывают значение разности угла в полуприемах $\Delta_{Л-П}$. Величина расхождения значения углов из двух полуприемов каждого приема не должна быть более 8" для теодолита ОТ-02 и ему равноточных.

Результаты измерений углов во всех комбинациях должны находиться в пределах допусков, приведенных в табл. 5.

Таблица 5

Допуски при измерении углов во всех комбинациях

Элементы наблюдений, к которым относятся допуски	Пункты триангуляции		Число направлений	
	1 класса	2 класса	до 5	6 и более
Расхождение значений одного и того же угла из разных приемов	4"	5"	–	–
Колебания средних значений одного и того же угла, вычисленных по результатам его непосредственных измерений и полученных как сумма или разность двух других непосредственно измеренных углов	–	–	3"	4"

Измеренные углы, не удовлетворяющие этим допускам, подлежат перенаблюдению на тех же установках лимба. Повторные наблюдения недоброкачественных приемов выполняют после окончания программы наблюдений на пункте и выполнения тщательного контроля всех приемов. Если значения какого-либо угла из разных приемов расходятся между собой более допустимой величины, то переделке подлежат приемы, имеющие как максимальное, Допуски при измерении углов во всех комбинациях так и минимальное значения угла.

Например, угол 2.3 (2 класса триангуляции), измеренный шестью приемами, имеет средние значения в приемах: I – 7,1"; II – 4,6"; III – 8,7"; IV – 4,0"; V – 3,0"; VI – 5,1". Значения угла в III и V приемах расходятся между собой на 5,7" (допуск 5"). Таким образом, перенаблюдению подлежит угол 2.3 на установках III и V приемов. Такое бисирование называют двусторонним. Иногда разрешается одностороннее бисирование, когда значение угла какого-либо приема грубо отличается от остальных значений этого угла. Приемы, требующие повторного бисирования, рекомендуется переделывать на измененной установке лимба.

Если число повторных приемов превышает 30 % от количества приемов, предусмотренных программой, то наблюдения всей программы на данном пункте выполняют заново.

Первоначальные значения всех переделанных приемов в обработку не включают. Порядок дальнейшей обработки угловых измерений рассмотрен в лабораторной работе № 5.

Сравнивая два основных способа угловых измерений, необходимо отметить, что каждый из рассмотренных способов имеет свои преимущества

и недостатки. Способ измерения углов во всех комбинациях более трудоемкий, чем способ круговых приемов (способ Струве). Однако способ во всех комбинациях позволяет измерять углы в любой последовательности, выбирать для наблюдений наиболее благоприятные условия видимости, не требует одновременной хорошей видимости по всем направлениям и менее требователен к жесткости знака, т.к. прием длится 2 – 4 мин.

При большем числе направлений (7 – 8 и более) способ измерения углов во всех комбинациях (Шрейбера) становится неэффективным. При этом значительно возрастает число подлежащих измерению углов, а число приемов сокращается до 3 – 4. По 3 – 4 приемам становится трудно судить о качестве измерений, затрудняется выбор приема, подлежащего переделке при неудовлетворении допусков.

Лабораторная работа № 5
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕ-
НИЙ В СПОСОБЕ ВСЕВОЗМОЖНЫХ КОМБИНАЦИЙ

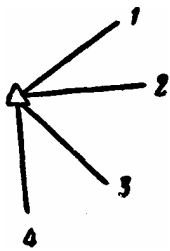
Таблица 1

Сводка результатов измерений горизонтальных углов на пункте Полигонный М 129

(способом измерения углов во всех комбинациях)

Триангуляция 2 класса 1974 г.
 Наблюдатель – Валишев В.
 Инструмент – ОГ-02М № 21512
 Журнал № 1
 Чертеж направлений

Тип знака – сложный сигнал
 Высота над маркой верхнего центра:
 столика для приборов 15,32 м
 горизонтальной оси теодолита 15,67 м
 верха визирной цели 18,95 м



Наблюдения выполнены с 15 по 17.V.1974 г.

№ пункта	Названия направлений	Уравненные на станции направления, $^{\circ} \prime \prime$	$(c'' + r'')_0, ''$	Приведенные к центрам направления, $^{\circ} \prime \prime$	Число направлений и приемов, вес направления, СКО
1	Лесной	0 00 00,00			$n = 4$ $m = 6$ $nm = 24$ $\mu = \pm 1,37''$ $M = \pm 0,28$
2	Дальний	44 15 30,76			
3	Басандайка	93 48 08,47			
4	Утес	141 33 10,06			

Вывод средних направлений на пункте Полигонный
 Начальное направление Лесной

Дата наблюдения	№ приема	Установка лимба, $^{\circ} \prime$	Значение угла, ''		
			I полуприем	II полуприем	Среднее
Угол 1.2 ($44^{\circ}15'$)					
15.05.1973 г.	I	0 00			
- // -	II	30 05			
- // -	III	60 10	34,3	27,0	30,6
- // -	IV	90 15	31,2	30,0	30,6
16.05.1973г.	V	120 20	31,7	29,1	30,4
- // -	VI	150 25	28,3	32,2	30,2
17.05.1973г.		0 00	26,7	30,5	28,6
- // -		30 05	32,2	30,8	31,5
		Среднее	30,43	30,22	30,32

Окончание табл. 1

Угол 1.4 (141°33')					
15.05.1973 г.	I	20 10	09,1	06,7	07,9
- // -	II	50 15	11,5	10,8	11,2
- // -	III	80 20	09,5	12,5	11,0
- // -	IV	110 25	09,7	08,1	08,9
16.05.1973 г.	V	140 30	14,7	10,5	12,6
- // -	VI	170 35	09,6	08,3	09,0
Среднее			10,68	09,48	10,10
Угол 2.4 (97°18')					
16.05.1973г.	I	54 20	40,7	35,2	38,0
- // -	II	84 25	42,2	41,4	41,8
- // -	III	114 30	36,4	36,3	36,4
16.05.1973г.	IV	144 35	39,7	41,2	40,4
- // -	V	174 40	39,0	42,1	40,6
- // -	VI	204 45	38,8	41,3	40,0
Среднее			39,47	39,58	39,53
Угол 1.3 (93°48')					
16.05.1973г.	I	10 05	07,7	09,9	08,8
- // -	II	40 10	07,5	08,5	08,0
- // -	III	70 15	09,0	08,6	08,8
16.05.1973г.	IV	100 20	08,6	06,6	07,6
- // -	V	130 25	09,4	09,4	09,4
- // -	VI	160 30	11,3	09,8	10,6
Среднее			08,92	08,80	08,87
Угол 2.3 (49°33')					
15.05.1973г.	I	64 25	36,5	35,7	36,1
- // -	II	94 30	37,6	35,8	36,7
- // -	III	124 35	32,3	35,5	33,9
- // -	IV	154 40	41,8	36,7	39,2
16.05.1973г.	V	184 45	38,8	39,8	39,3
- // -	VI	214 50	39,2	34,7	37,0
		124 35	33,6	36,4	35,0
		184 45	37,3	39,2	38,2
Среднее			37,67	36,42	37,03
Угол 3.4(47°45')					
15.05.1973г.	I	98 48	00,1	02,7	01,4
- // -	II	123 53	00,4	02,6	01,5
- // -	III	153 58	01,0	00,5	00,8
16.05.1973г.	IV	184 03	02,9	00,0	01,4
- // -	V	214 08	04,5	02,4	03,4
- // -	VI	224 13	01,6	15'57,2"	15'59,4"
Среднее			01,75	00,90	01,32

Уравнивание измеренных углов на станции

1.2	1.3	1.4	2.3	2.4	3.4
30,32	08,87	10,10	37,03	39,53	01,32
30,32	08,87	10,10	37,03	39,53	01,32
30,57	08,78	09,85	38,21	39,78	01,23
31,84	07,35	10,19	38,55	38,35	02,50
Среднее					
30,76	08,47	10,06	37,71	39,30	01,59
$\nu = -0,44$	+0,40	+0,04	-0,68	+0,23	-0,27
$\Sigma \nu^2 = 0,9434$					

Сводку составил: П.Н. Ефимов

Проверил: В.В. Валишев

Получив средние значения всех измеренных углов, приступают к уравниванию их на станции. Для этого в форму, расположенную в конце «сводки результатов», выписывают в соответствующие графы средние значения измеренных углов. В соответствии с правилом уравнивания угла на станции средние значения каждого измеренного угла записывают дважды, т.е. с весом 2. Затем вычисляют значения углов из комбинаций и их результаты записывают в соответствующие им графы. По этим значениям, два из которых непосредственно измерены, а остальные получены как сумма или разность 2-х измеренных углов, вычисляют уравненные на станции значения каждого угла (см. табл. 1). При этом колебания средних значений одного и того же угла, полученных из непосредственно измеренных его значений и вычисленных из комбинаций, не должны превышать 3 или 4", что зависит от числа направлений на пункте.

Контроль уравненного значения каждого угла выполняют так же, как при вычислении углов из комбинаций, только значение уравненного угла при этом вычисляют как сумму или разность двух других уравненных углов. Расхождение уравненного угла с любой комбинацией его допускается в пределах 0,01".

Убедившись в правильности выполненного уравнивания на станции, вычисляют для каждого угла разность между непосредственно измеренным его значением и уравненным (v) и производят оценку точности.

Средняя квадратическая погрешность угла из одного приема вычисляется по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{2m \sum vv}{(n-1)(n-2)}}.$$

Средняя квадратическая погрешность направления, уравненного на станции,

$$M = \frac{\mu}{\sqrt{mn}},$$

где m – число приемов;
 n – число направлений.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНЫ ДЕЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПО РЕЙКЕ

Действующая инструкция требует проводить полные лабораторные проверки и исследования нивелира по получении его с завода и после капитального ремонта. До выезда на работы исполнитель должен произвести так называемые полевые проверки и исследования нивелира. К исследованиям относятся:

- определение цены деления цилиндрического уровня по рейке;
- определение погрешности совмещения изображений концов пузырька уровня по рейке;
- определение цены деления отсчетного барабана для разных расстояний до рейки;
- определение коэффициента дальномера и асимметрии нитей.

Необходимо помнить, что каждое исследование имеет смысл только при условии выполнения его по полной программе, предусмотренной инструкцией.

Определение цены деления цилиндрического уровня по рейке. Такое исследование ставится с целью определения, достаточна ли точность уровня прибора для выполнения нивелирования II класса.

Если наводить трубу на два соседних штриха рейки и при каждом наведении на штрих брать отсчеты по концам пузырька уровня, то значение угла α (рис. 1) можно вычислить двумя способами. С одной стороны, учитывая малость l , найдем

$$\alpha'' = \frac{lp''}{S}, \quad (1)$$

с другой стороны, наклону оси уровня на угол α соответствует перемещение пузырька уровня на n полуделений его шкалы, т.е.

$$\alpha'' = \frac{\tau''}{2} \cdot n, \quad (2)$$

где τ'' – цена деления уровня.

Сопоставляя равенства (1) и (2), находим, что

$$\frac{\tau''}{2} \cdot n = \frac{lp''}{S},$$

откуда

$$\frac{\tau''}{2} = \frac{lp''}{Sn},$$

где S – измеренное расстояние от нивелира до рейки в полумиллиметрах.

Выполняется исследование в тихую и желательнo пасмурную погоду. За два часа до начала исследований нивелир устанавливают на трех забитых в землю кольях и защищают зонтам от солнца. На расстоянии 40 – 50 м забивают прочно в землю два кола, один выше другого на 15 – 20 см. В колья вбивают кованые гвозди с овальной шляпкой. Для наблюдения за температурой подвешивают в тени термометр. Следят за длиной пузырька уровня, величина изменения длины которого не должна превосходить 0,2 мм на 1 °С.

Программа исследования состоит из четырех приемов, каждый из которых включает два полуприема. В нечетных приемах рейка ставится на первый кол, в четных – на второй. Рекомендуется два приема сделать в первой половине дня, два других – во второй, по возможности при другой температуре воздуха.

Рассмотрим порядок работы в одном приеме.

Приводят нивелир в рабочее положение, наводят трубу на рейку. Записывают температуру воздуха и длину пузырька уровня. Результаты измерений записывают в ведомость (табл. 1).

Затем, действуя элевационным винтом, точно совмещают биссектор нитей сетки с одним из штрихов рейки так, чтобы в этот момент концы пузырька уровня заняли противоположные крайние положения. Можно использовать штрихи как основной, так и дополнительной шкал. Например, пузырьки заняли положение, показанное на рис. 2, а.

Совмещать штрих с биссектором элевационным винтом надо на ввинчивание.

Подождав, чтобы уровень установился, берут отсчеты по левому и правому его концам. Далее элевационным винтом точно наводят биссектор нитей сетки на смежный штрих рейки, но при этом концы пузырька уровня должны сблизиться (рис. 2, б).

Записав отсчеты по концам пузырька и продолжая вращение элевационного винта в том же направлении, наводят биссектор на третий штрих рейки. Тогда пузырьки займут положение, показанное на рис. 2, в.

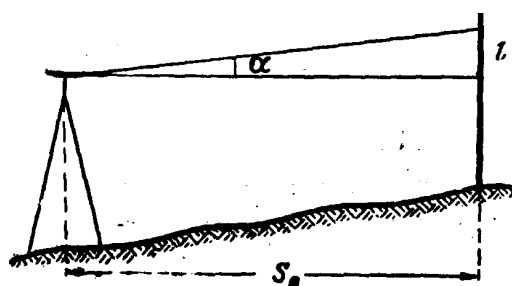


Рис. 1

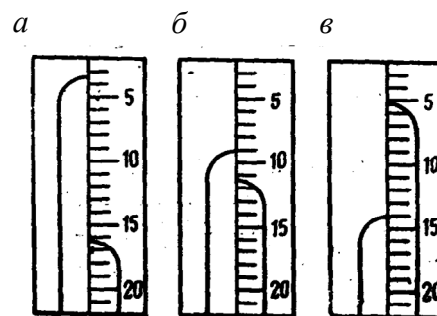


Рис. 2

Таблица 1

Определение цены деления уровня по рейке

Нивелир НА-1 № 01652

На шкале уровня 25 делений; подпись делений от 0 до 25; нуль делений со стороны объектива

Расстояние до рейки 46,52 м Дата 4. VI. 1971 г. Время 8^h15^m

№ приема	Длина пузырька уровня, мм	t^0 воздуха	Отсчеты по рейке	Отсчеты по рейке				П-Л		Среднее П-Л	Расстояние по рейке, 1/2 мм	Число полуделений уровня
				прямой ход		обратный ход		прямой ход	обратный ход			
				Л	П	Л	П					
I	70,2	+15,3	30,6	4,2 – 17,1	4,2 – 17,2	+12,9	+13,0	+12,95	10	11,10		
			30,7	9,7 – 11,6	9,8 – 11,6	+1,9	+1,8	+1,85	10	10,70		
			30,8	15,1 – 6,3	15,2 – 6,3	-8,8	-8,9	-8,85				
	70,2	+15,7	30,6	4,3 – 17,1	4,3 – 17,1	+12,8	+12,9	+12,85	10	11,05		
			30,7	9,9 – 11,7	9,9 – 11,7	+1,8	+1,8	+1,80	10	10,75		
			30,8	15,2 – 6,3	15,2 – 6,3	-8,9	-9,0	-8,95				
70,1	+16,0											
II	70,1	+16,3	58,4	58,4 – 70,1	58,6 – 70,2	+11,7	+11,6	-11,65	40	13,60		
			30,3	5,7 – 16,0	5,7 – 15,9	+10,3	+10,2	+10,25	10	11,10		
			30,4	11,1 – 10,2	11,1 – 10,3	-0,9	-0,8	-0,85				
			30,5	16,6 – 5,0	16,5 – 4,8	-11,7	-11,7	-11,65	10	10,80		
	70,0	+16,4	30,3	5,7 – 15,8	5,6 – 15,8	+10,1	+10,2	+10,15	10	11,00		
			30,4	11,1 – 10,2	11,0 – 10,2	-0,9	-0,8	-0,85	10	10,85		
			30,5	16,6 – 4,9	16,6 – 4,9	-11,7	-11,7	-11,70				
70,0	+16,5											
				66,8 – 62,1	66,5 – 61,9	- 4,7	- 4,6	-4,65	40	43,75		
III	Последние два приема выполнены в вечернее время, приведены только конечные результаты								40	43,65		
IV									40	43,75		
Сумма из четырех приемов						160 174,75						
$\tau'' = \frac{160 \cdot 206265}{2 \cdot 174,75 \cdot 93040} = 2,03'' \text{ на } 0,8 \text{ мм,}$ $\tau'' = 2,03'' \cdot 2 \cdot 2,5 = 10,2'' \text{ на } 2 \text{ мм} < 12''.$												
Наблюдал: А.В. Петров								Записывал: Н.П. Васильев				

Берут отсчеты по концам пузырька уровня и записывают. На этом прямой ход заканчивается.

Сразу же приступают к наблюдению обратного хода. Для этого элевационный винт двигают на четверть оборота в том же направлении, а затем, сменив его вращение на обратное, вводят в биссектор нитей сетки те же штрихи рейки, только в обратной их последовательности. Начинают с третьего штриха. При каждом совмещении берут отсчеты. Прямой и обратный ходы вместе составляют полуприем. Закончив его, снова записывают температуру воздуха и измеряют длину пузырька уровня.

Переходя ко второму полуприему, надо немного изменить горизонт инструмента. Это можно сделать или подъемными винтами, или поворотом на несколько делений отсчетного барабана. При выполнении полуприема отсчетный барабан не трогать.

Как второй полуприем, так и все остальные выполняются аналогично первому полуприему. Переходя ко второму приему, следует рейку переставить на второй кол.

На протяжении четырех приемов визирный луч трубы переместился по рейке на величину $l = 160$ полумиллиметров, что соответствует перемещению пузырька уровня на число полуделений уровня $n = 174,75$ (см. табл. 1). Тогда

$$\frac{\tau''}{2} = \frac{160 \cdot 206265}{174,75 \cdot 93040} = 2,03'',$$

отсюда $\tau'' = 4,06''$ на 0,8 мм или 10,2'' на 2 мм, что удовлетворяет требованию инструкции по нивелированию II класса.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Яковлев, Н.В. Высшая геодезия: учеб. для вузов / Н.В. Яковлев. – М.: Недра, 1989. – 449 с.
2. Закатов, П.С. Курс высшей геодезии / П.С. Закатов. – М.: Недра, 1976. – 510 с.
3. Болотов, П.А. Практикум по основным геодезическим работам / П.А. Болотов, С.В. Шубин, И.А. Райман. – М.: Недра.

Дополнительная

4. Яковлев, Н.В. Практикум по высшей геодезии / Н. В. Яковлев. – М.: Недра, 1980. – 300 с.
5. Захаров, А.И. Геодезические приборы: справ. / А.И. Захаров. – М.: Недра, 1998. – 314 с.
6. Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР. – М.: Недра, 1966.
7. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М.: Недра, 1991.
8. Нивелирование I и II классов. Практическое руководство. – М.: Недра, 1982.
9. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации ГКИНП (ГНТА) – 01-006-03. – М., 2004. – 28 с.

Учебное издание

ШАРОГЛАЗОВА Галина Александровна

ВЫСШАЯ ГЕОДЕЗИЯ

ОСНОВНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Учебно-методический комплекс
для студентов специальности 1-56 02 01 «Геодезия»
и слушателей ИПК специальности 1-56 02 71
«Прикладная геодезия и геодезическое обеспечение кадастра»

2-е издание

Редактор *Т.А. Дарьянова*

Дизайн обложки *И.С. Васильевой*

Подписано в печать 13.12.10. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 8,59. Уч.-изд. л. 8,41. Тираж 10. Заказ № 2134.

Издатель и полиграфическое исполнение –
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.09

ЛП № 02330/0494256 от 27.05.09

Ул. Блохина, 29211440, г. Новополоцк.