

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

Г. Е. Головань, П. Ф. Парадня, В. А. Бондаренко

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДЕЗИЯ

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Учебно-методический комплекс
для студентов строительных специальностей

Новополоцк
ПГУ
2011

УДК 528.48
ББК 26.1я73
Г61

Рекомендовано к изданию методической комиссией
геодезического факультета в качестве учебно-методического комплекса
(протокол № 7 от 25.02.2011)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

исполняющий обязанности начальника Новополоцкого геодезического отряда
Витебского отдела инженерных изысканий ПР УП «Геосервис» А. А. КЛЕЩЕНОК;
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
прикладной геодезии и фотограмметрии УО «ПГУ» В. В. ЯЛТЫХОВ

Головань, Г. Е.

Г61 Инженерная геодезия. Общая часть : учеб.-метод. комплекс для студентов строительных специальностей / Г. Е. Головань, П. Ф. Парадня, В. А. Бондаренко. – Новополоцк : ПГУ, 2011. – 192 с.
ISBN 978-985-531-244-5.

Изложены теоретические и практические основы инженерной геодезии по темам «Топографические планы и карты», «Геодезические измерения», «Топографические съемки» в виде трех модулей. Каждый модуль содержит теоретический и практический материал с контрольными вопросами для проверки степени усвоения знаний.

Предназначен для студентов строительных специальностей вузов.

УДК 528.48
ББК 26.1я73

ISBN 978-985-531-244-5

© Головань Г. Е., Парадня П. Ф., Бондаренко В. А., 2011
© УО «Полоцкий государственный университет», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Модуль 1. ОБЩИЕ И ВВОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ	6
Тема 1. Основные сведения и определения	8
1.1. Предмет геодезии, ее задачи, содержание	8
1.2. Значение геодезии в народном хозяйстве	11
1.3. Инженерная геодезия как научная дисциплина	11
Тема 2. Форма и размеры земли. Системы координат	13
2.1. Сведения о форме и размерах Земли	13
2.2. Метод проекции в геодезии. Влияние кривизны Земли на результаты измерений горизонтальных и вертикальных расстояний	15
2.3. Основные системы координат, применяемые в геодезии	18
Тема 3. Ориентирование линий. Прямая и обратная геодезические задачи на плоскости	25
3.1. Углы ориентирования	25
3.2. Прямая и обратная геодезические задачи на плоскости	29
Тема 4. Топографические планы и карты	30
4.1. План, карта, цифровая модель местности	30
4.2. Разграфка и номенклатура топографических карт и планов	32
4.3. Условные знаки топографических карт и планов	34
4.4. Решение задач по топографической карте	39
4.5. Определение площадей по картам и планам	45
Тема 5. Элементы теории ошибок измерений	48
5.1. Виды измерений и ошибок измерений	48
5.2. Оценка точности равноточных измерений	51
5.3. Оценка точности измерений по разностям двойных измерений	55
5.4. Предельная и относительная ошибки	56
5.5. Оценка точности ряда равноточных измерений	57
5.6. Оценка точности неравноточных измерений	57
5.7. Основные правила вычислений	59
Тема 6. Геодезические сети	61
6.1. Методы построения плановых сетей	62
6.2. Развитие государственной геодезической сети	65
6.3. Закрепление пунктов плановых геодезических сетей	70
6.4. Государственная нивелирная сеть	71
6.5. Государственная геодезическая сеть Республики Беларусь	73
Лабораторная работа №1. Решение задач по топографическим картам и планам	77
Контрольные вопросы по модулю 1	78
Модуль 2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	81
Тема 7. Угловые измерения	83
7.1. Принцип измерения горизонтальных и вертикальных углов	83
7.2. Угломерные приборы, их виды, основное устройство	84
7.3. Поверки и юстировки приборов	90
7.4. Отсчетные устройства	96
7.5. Способы измерения углов	97
7.6. Точность измерения углов	99

Тема 8. Линейные измерения	101
8.1. Измерение длин линий механическими приборами	101
8.2. Определение недоступных расстояний	107
8.3. Оптические дальномеры. Нитяной дальномер	107
8.4. Светодальномеры, электронные тахеометры	110
Тема 9. Нивелирование	115
9.1. Сущность и методы нивелирования	115
9.2. Геометрическое нивелирование	116
9.3. Нивелиры	118
9.4. Нивелир с уровнем при трубе	119
9.5. Поверки нивелира	120
9.6. Нивелирные рейки	123
9.7. Влияние кривизны Земли и рефракции на результаты нивелирования	124
9.8. Нивелирные сети	125
9.9. Тригонометрическое нивелирование	127
9.10. Сведения о современных нивелирах	128
Тема 10. Спутниковые методы измерений	130
10.1. Общее понятие о системах спутниковой навигации	130
10.2. Принципы определения координат точек местности с использованием GPS	132
10.3. Измерение расстояний до навигационных спутников GPS	134
10.4. Приемники GPS	138
10.5. Режимы наблюдений	143
Лабораторная работа № 2. Изучение технических теодолитов. Устройство и отсчетные приспособления	146
Лабораторная работа № 3. Поверки технических теодолитов. Измерение горизонтальных, вертикальных углов и магнитных азимутов	147
Лабораторная работа № 4. Изучение точных нивелиров. Поверки нивелиров	148
Контрольные вопросы по модулю 2	149
Модуль 3. ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ	152
Тема 11. Топографические съемки	153
11.1. Виды топографических съемок	153
11.2. Плановое и высотное съемочное обоснование	155
11.3. Теодолитная съемка	163
11.4. Тахеометрическая съемка	172
11.5. Сканерная съемка	180
11.6. Фототопографическая съемка	181
Лабораторная работа № 5. Теодолитная съемка	184
Лабораторная работа № 6. Тахеометрическая съемка	187
Контрольные вопросы по модулю 3	190
ЛИТЕРАТУРА	191

ВВЕДЕНИЕ

Изменившиеся в последнее десятилетие организационные и экономические основы деятельности строительного комплекса республики требуют повышения качественного уровня всех технологических звеньев строительного производства. Одним из основных критериев возможности качественного выполнения работ строительной организацией является достаточный уровень геодезической подготовки специалистов, укомплектованность современным оборудованием. Знание возможностей современных средств геодезии, необходимость, целесообразность и экономическая эффективность их применения должны постепенно и неуклонно входить в сознание будущих руководителей строительного производства, которые в недалеком будущем будут определять техническую политику отрасли.

Геодезическое обеспечение строительства как техническая система состоит из двух взаимосвязанных подсистем: геодезического обеспечения изысканий и проектирования, и собственно геодезического обеспечения строительства и эксплуатации объектов.

В настоящее время дисциплина «Инженерная геодезия», практически для всех строительных специальностей, изучается **полностью** на первом курсе в ряду общеобразовательных дисциплин без осязаемой связи с будущей профессией. Совершенно очевидно, что без знания основ специальности изучение отдельных разделов инженерной геодезии крайне неэффективно (как изучение специальных дисциплин без усвоения основ геодезии).

Поэтому можно считать рациональным деление курса на две части, соответствующие подсистемам геодезического обеспечения строительства: общую (1-2 курс) и специальную часть (3-4) курс. Данный учебно-методический комплекс ориентирован на изучение общей части.

При его разработке учитывался определенный контекст педагогических инноваций:

- 1) современные дидактические требования к содержанию образования;
- 2) проектирование на принципах модульного обучения;
- 3) соблюдение требований технологизации процесса обучения (использование образовательных стандартов, педагогических технологий).

Учебно-методический комплекс разработан на основании действующих в настоящее время образовательных стандартов специальностей 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство», 1-70 02 02 «Управление и экспертиза недвижимости», 1-70 03 01 «Автомобильные дороги», 1-70 04 02 «Теплогасоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна», 1-70 04 02 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» и типовой учебной программы по дисциплине «Инженерная геодезия», составленной на кафедре инженерной геодезии Белорусского национального технического университета.

МОДУЛЬ 1

ОБЩИЕ И ВВОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Дидактические цели модуля 1

Студент должен знать:	Студент должен уметь:
<ul style="list-style-type: none"> – основные системы координат, применяемые в геодезии; – элементы ориентирования; – прямую и обратную геодезические задачи на плоскости; – условные знаки топографических планов и карт; – разграфку и номенклатуру топографических карт и планов; – способы определения площадей; – характеристики точности геодезических измерений; – методы построения плановых и высотных геодезических сетей; – принципы построения государственной геодезической сети Республики Беларусь 	<ul style="list-style-type: none"> – определять прямоугольные и географические координаты точек на планах и картах; – определять элементы ориентирования линий; – решать прямую и обратную геодезические задачи; – определять на картах и планах основные формы рельефа, отметки точек, уклоны линий; – определять площади участков аналитическим, графическим и механическим способами; – выполнять оценку точности геодезических измерений

Учебно-информационный блок модуля 1

Темы занятия и рассматриваемые вопросы	Тип занятия	Вид (форма) занятия
ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ: <ul style="list-style-type: none"> – предмет геодезии, ее задачи, содержание; – значение геодезии в народном хозяйстве 	Приобретение новых научных знаний	Лекция
ФОРМА И РАЗМЕРЫ ЗЕМЛИ. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ: <ul style="list-style-type: none"> – сведения о форме и размерах Земли; – метод проекции в геодезии. Влияние кривизны Земли на результаты измерений горизонтальных и вертикальных расстояний; – основные системы координат, применяемые в геодезии 	Приобретение новых научных знаний Углубление и систематизация знаний	Лекция Самостоятельная работа

Темы занятия и рассматриваемые вопросы	Тип занятия	Вид (форма) занятия
<p>ОРИЕНТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ. ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ НА ПЛОСКОСТИ:</p> <ul style="list-style-type: none"> – углы ориентирования; – прямая и обратная геодезические задачи на плоскости 	<p>Приобретение новых научных знаний</p> <p>Углубление и систематизация знаний</p>	<p>Лекция</p> <p>Самостоятельная работа</p>
<p>ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ПЛАНЫ И КАРТЫ:</p> <ul style="list-style-type: none"> – план, карта, цифровая модель местности; – разграфка и номенклатура топографических карт и планов; – условные знаки топографических карт и планов; – решение задач по топографической карте; – определение площадей по картам и планам 	<p>Приобретение новых научных знаний</p> <p>Углубление и систематизация знаний</p>	<p>Лекция</p> <p>Самостоятельная работа</p>
<p>ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ:</p> <ul style="list-style-type: none"> – виды измерений и ошибок измерений; – оценка точности равнооточных измерений; – оценка точности измерений по разностям двойных измерений; – предельная и относительная ошибки; – оценка точности ряда равнооточных измерений; – оценка точности неравнооточных измерений; – основные правила геодезических вычислений 	<p>Приобретение новых научных знаний</p> <p>Углубление и систематизация знаний</p>	<p>Лекция</p> <p>Самостоятельная работа</p>
<p>ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ:</p> <ul style="list-style-type: none"> – методы построения плановых сетей; – развитие государственной геодезической сети; – закрепление пунктов плановых геодезических сетей; – государственная нивелирная сеть; – государственная геодезическая сеть Республики Беларусь 	<p>Приобретение новых научных знаний</p> <p>Углубление и систематизация знаний</p>	<p>Лекция</p> <p>Самостоятельная работа</p>

ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Предмет геодезии, ее задачи, содержание

Геодезия – одна из древнейших наук. Она возникла задолго до нашей эры в результате практической деятельности человека (во времена начала земледелия) и играла важную роль в вопросах землепользования и инженерного строительства каналов, пирамид и т.п.

Геодезия как наука складывалась и развивалась тысячелетиями. Слово «геодезия» (греч. *geōdaisia*, от *gē* – Земля и *dáio* – делю, разделяю) в переводе с греческого языка означает «землеразделение». Это название соответствовало содержанию геодезии во времена ее зарождения на начальном этапе.

С развитием человеческого общества, повышением роли науки и техники расширялось содержание геодезии, усложнялись задачи, которые ставила перед ней жизнь. Известный ученый-геодезист В. В. Витковский в начале прошлого века так охарактеризовал геодезию: «Геодезия представляет одну из полезнейших отраслей знания; все наше земное существование ограничено пределами Земли, и изучать ее вид и размеры человечеству так же необходимо, как отдельному человеку – ознакомиться с подробностями своего жилья».

Современная геодезия – многогранная наука, решающая сложные научные и практические задачи. Это наука об определении формы и размеров Земли, об измерениях на земной поверхности с целью отображения ее на планах и картах.

Среди множества задач геодезии можно выделить долговременные задачи и задачи на ближайшие годы.

К первым относятся:

- определение формы, размеров и гравитационного поля Земли;
- распространение единой системы координат на территорию отдельного государства, континента и всей Земли в целом;
- изучение глобальных смещений блоков земной коры;
- изображение участков земной поверхности на топографических картах и планах.

Ко вторым в настоящее время относятся:

- создание и внедрение геоинформационных систем (ГИС);
- создание государственных и локальных кадастров: земельного, городского, водного, лесного и т.д.;

– топографо-геодезическое обеспечение делимитации (определения) и демаркации (обозначения) государственной границы Республики Беларусь;

– разработка и внедрение стандартов в области цифрового картографирования;

– создание цифровых и электронных карт и их банков данных;

– выполнение измерений на земной поверхности (и под землей), необходимых для проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений, эксплуатации природных богатств поверхности Земли и ее недр;

– разработка концепции и государственной программы повсеместного перехода на спутниковые методы автономного определения координат.

Все задачи геодезии решаются на основе специальных – *геодезических* – измерений, выполняемых при помощи специальных – *геодезических* – приборов.

Создание наиболее целесообразных типов геодезических приборов и разработка на их основе новых методов измерений, а также разработка методов и приемов обработки результатов измерений для определения искомым величин позволит облегчить и ускорить решение научно-технических задач геодезии.

Развитие геодезии привело к разделению ее на высшую геодезию, космическую геодезию, топографию, фотограмметрию и инженерную (прикладную) геодезию. Каждый из этих разделов имеет свой предмет изучения, свои задачи и методы их решения, т.е. вправе считаться самостоятельной научно-технической дисциплиной.

Высшая геодезия определяет:

– вид и размеры Земли (как планеты);

– внешнее гравитационное поле Земли (значение и направление силы тяжести в земном пространстве и на поверхности);

– взаимное расположение значительно удаленных друг от друга геодезических пунктов;

– точность изображения пунктов на плоскости, в проекции с учетом искажений из-за кривизны земной поверхности.

Космическая геодезия рассматривает теорию и методы решения научных и практических задач на земной поверхности, на основе наблюдений за небесными телами с Земли и по данным о Земле, полученным из

космоса (с межпланетных кораблей, орбитальных станций и искусственных спутников).

Топография («топос» – место, «графо» – пишу; дословно – описание местности) рассматривает способы изучения земной поверхности и изображения ее на картах и планах.

Фотограмметрия решает задачи измерений по аэрофото- и космическим снимкам для различных целей, в том числе для создания карт и планов, выполнения обмеров зданий и сооружений и т. п.

Инженерная (прикладная) геодезия разрабатывает методы геодезических работ, выполняемых при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации разнообразных инженерных сооружений, установке и монтаже специального оборудования, а также при изучении, освоении и охране природных ресурсов. По виду работ инженерная геодезия подразделяется на наземную, подземную (маркшейдерское дело), надводную, подводную.

Геодезия развивается в тесной связи с другими научными дисциплинами. Большое влияние на развитие геодезии оказывают математика, астрономия, физика.

Математика вооружает геодезию средствами анализа и методами обработки результатов измерений.

Астрономия обеспечивает необходимыми исходными данными.

На основе законов *физики* рассчитывают оптические и механические узлы геодезических приборов. В современном геодезическом приборостроении все больше и больше используются достижения в области *автоматики и электроники*.

Тесную связь геодезия имеет также с географией, геологией, геоморфологией. Знание *географии* обеспечивает правильную трактовку элементов ландшафта, который составляют рельеф, естественный покров земной поверхности (растительность, почвы, моря, озера, реки и т.д.) и результаты деятельности человека (населенные пункты, дороги, средства связи, предприятия и т.д.). Формы рельефа и закономерности их изменения познаются с помощью *геологии и геоморфологии*.

В свою очередь геодезические данные являются необходимой информационной основой в основных сферах науки и производства.

На современном этапе геодезия переходит на принципы геоинформатики и геоинформационных компьютерных систем и широко использует цифровое и электронное картографирование, дистанционное зондиро-

вание Земли аэрокосмическими средствами, глобальные навигационные системы определения местоположения.

1.2. Значение геодезии в народном хозяйстве

Геодезические работы выполняются на земной поверхности и под землей, на воде и под водой, в околоземном пространстве и в космосе. Геодезия находит широкое применение практически во всех отраслях народного хозяйства: при разведке и добыче полезных ископаемых, строительстве промышленных и гражданских комплексов, зданий и сооружений, в дорожном и мелиоративном строительстве, в водном и лесном хозяйстве, землеустройстве, науке, обороне страны и т.д. Можно сказать, что выполнение нужд практически любого производства немислимо без геодезического и топографического обеспечения.

Крупномасштабные съемки застроенных и незастроенных территорий, трассирование каналов, дорог, трубопроводов и подземных сооружений, перенесение в натуру проектов зданий и сооружений, выполнение точных разбивочных работ при монтаже электростанций (гидротехнических, тепловых, атомных), высоконапорных плотин, мостовых сооружений, промышленно-заводских и городских комплексов, метрополитенов и тоннелей различного назначения, высотных зданий и башенных сооружений (телебашен, промышленных труб, градирен) – далеко не полный перечень инженерных геодезических работ.

Белорусская государственная топографо-геодезическая и картографическая служба находится в подчинении Государственного комитета по имуществу при Совете Министров Республики Беларусь. Одной из главных задач Госкомимущества является проведение единой государственной политики в области геодезии.

1.3. Инженерная геодезия как научная дисциплина

Несмотря на многообразие инженерных сооружений при их проектировании и возведении решаются следующие **общие задачи**:

- получение геодезических данных при разработке проектов строительства сооружений (инженерно-геодезические изыскания);
- определение на местности основных осей и границ сооружений в соответствии с проектом строительства (разбивочные работы);

- обеспечение в процессе строительства геометрических форм и размеров элементов сооружения в соответствии с его проектом, геометрических условий установки и наладки технологического оборудования;
- определение отклонений геометрической формы и размеров возведенного сооружения от проектных (исполнительные съемки);
- изучение деформаций (смещений) земной поверхности под сооружением, самого сооружения или его частей под воздействием природных факторов и в результате действий человека.

Для решения каждой из указанных задач применительно к разным видам сооружений существуют свои методы, средства и требования к точности их выполнения. Например, при инженерно-геодезических изысканиях в основном производят измерения для составления карт и планов, на которых изображают то, что есть на местности, а при строительстве здания, наоборот, определяют на местности то место, где здание должно располагаться по проекту. Конструкции здания устанавливают на предусмотренные проектом места с погрешностью 5...10 мм, детали заводского конвейера – 1...2 мм, а оборудование физических лабораторий (ускорителей ядерных частиц) – 0,2...0,5 мм.

Инженерная геодезия тесно связана с другими геодезическими дисциплинами и использует методы измерений и приборы, предназначенные для общегеодезических целей. В то же время для геодезического обеспечения строительно-монтажных работ, наблюдений за деформациями сооружений и других подобных работ применяют специальные (отличные от общегеодезических) приемы и методы измерений, используют специальную измерительную технику и автоматизированные системы.

ТЕМА 2. ФОРМА И РАЗМЕРЫ ЗЕМЛИ. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

2.1. Сведения о форме и размерах Земли

Поверхность Земли общей площадью 510 млн. км² состоит из Мирового океана (71%) и суши (29%).

Фигура Земли обусловлена воздействием многих процессов, связанных с ее образованием и существованием. Решающее значение при этом имеют *центробежные* силы и силы *внутреннего тяготения*.

Если бы Земля была однородна и неподвижна, то под действием сил только внутреннего тяготения, как фигура равновесия, она бы имела форму *шара*.

Вследствие же центробежной силы, вызванной вращением Земли вокруг своей оси, она приобрела бы форму *сфероида, сплюснутого у полюсов*.

Представить фигуру Земли в качестве сфероида можно с большим обобщением. Реальная поверхность Земли – это поверхность материков, дна морей и океанов. Она сложна и напоминает сфероид лишь в целом. Для изучения фигуры Земли введено понятие *уровенной поверхности*. Под ней подразумевают такую поверхность, точки которой имеют одинаковый потенциал силы тяжести. Линию, совпадающую с направлением силы тяжести, называют *отвесной линией*.

Уровенных поверхностей можно провести бесконечное количество. Но ту из них, которая совпадает со средней поверхностью Мирового океана в спокойном состоянии, мысленно продолженную под материками, по предложению немецкого математика и физика И. Б. Листинга в 1873 г. называют *основной уровенной поверхностью*, а тело, ограниченное этой поверхностью, – *геоидом*.

Геоид – сложная, замкнутая фигура. Одной из ее особенностей является то, что отвесная линия в любой точке физической (реальной) поверхности Земли *перпендикулярна* к поверхности геоида (основной уровенной поверхности), например, отвесная линия *MN* (рис. 2.1).

Следует отметить, что вследствие действия различных внутренних и внешних сил геоид не является правильной в математическом отношении фигурой, т.е. не может быть выражен математическим уравнением. Это не позволяет на поверхности геоида выполнять обработку геодезических измерений.

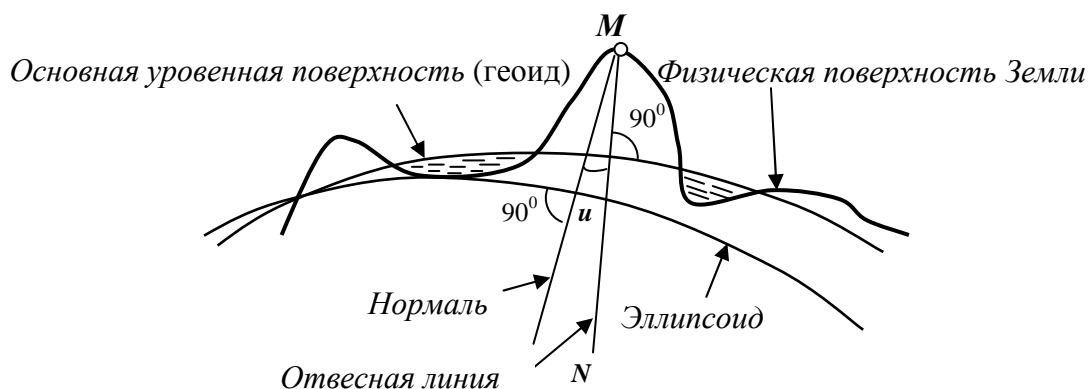


Рис. 2.1. Поверхности геоида и эллипсоида

Вместе с тем, исследуя фигуру Земли, ученые разных стран установили, что отступления поверхности геоида от поверхности правильной в математическом отношении фигуры (эллипсоида) незначительны, и не превышают в самом неблагоприятном случае 150 м, что пренебрегаемо мало по сравнению с размерами Земли.

Поэтому поверхность эллипсоида, образованного вращением эллипса вокруг его малой оси PP_1 (рис. 2.2), принимают в качестве математической фигуры Земли и обработку геодезических измерений выполняют на его поверхности.

Параметрами, определяющими размеры эллипсоида, являются большая a и малая b полуоси и полярное сжатие α , которое определяется по формуле

$$\alpha = \frac{a - b}{a}. \quad (2.1)$$

Эллипсоид с параметрами a , b и α , определенными по результатам измерений на земной поверхности, называют земным эллипсоидом.

Земной эллипсоид, характеризующий Землю в целом, называют общим земным эллипсоидом.

Существуют земные эллипсоиды, которые определенным образом

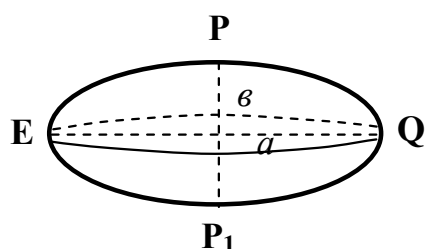


Рис. 2.2. Земной эллипсоид

ориентированы в теле Земли на территории одной или нескольких стран. Они имеют размеры полуосей и полярного сжатия, определенные по результатам измерений, выполненных на территории одной или нескольких стран. Такие эллипсоиды называют референц-эллипсоидами.

Параметры эллипсоида, полученные по результатам обработки геодезических измерений, выполненных на территории СССР в период с 1925 по 1940 гг. коллективом ученых под руководством Ф. Н Красовского, введены в действие постановлением Совета Министров СССР № 746 от 20 апреля 1946 г. Этот эллипсоид носит название *референц-эллипсоида Красовского*. Его параметры опубликованы в открытой печати и соответствуют следующим значениям: $a = 6378245$ м, $b = 6358863$ м, $\alpha = 1:298,3$.

В настоящее время на поверхности референц-эллипсоида Красовского выполняется обработка результатов геодезических измерений на территории Российской Федерации, Республики Беларусь, других стран СНГ и некоторых государств Западной Европы.

В инженерной геодезии и топографии условно считают, что Земля имеет форму шара, объем которого равен объему земного эллипсоида, радиус шара $R = 6\,371\,116$ м.

2.2. Метод проекции в геодезии.

Влияние кривизны Земли на результаты измерений горизонтальных и вертикальных расстояний

Изобразить земную поверхность на плоскости – значит изобразить на ней очертания различных предметов местности. Всякий контур – это непрерывный ряд точек. Изображение земной поверхности на плоскости сводится, таким образом, к изображению отдельных точек.

При изображении на плоскости (листе бумаги) различных контуров земной поверхности все их точки проецируют со сложной физической поверхности Земли на более простую поверхность по перпендикулярам к этой поверхности (рис. 2.3). Таковыми поверхностями могут быть поверхность земного эллипсоида, шара или плоскость.

*Проецирование точек земной поверхности по перпендикулярам к принятой поверхности называется **ортогональным** проецированием.*

При изображении небольших по площади участков местности на плоскости (на плане) пренебрегают кривизной, т.е. участок местности принимают за плоскость. Какими же должны быть размеры участков, чтобы кривизной земной поверхности можно было бы пренебречь?

Примем фигуру Земли за шар радиуса R (рис. 2.4). Пусть $AB = S$ – расстояние на шаре, α – центральный угол, соответствующий дуге S . Про-

ведем касательную плоскость в точке A и продолжим радиус OB до пересечения с этой плоскостью в точке C .

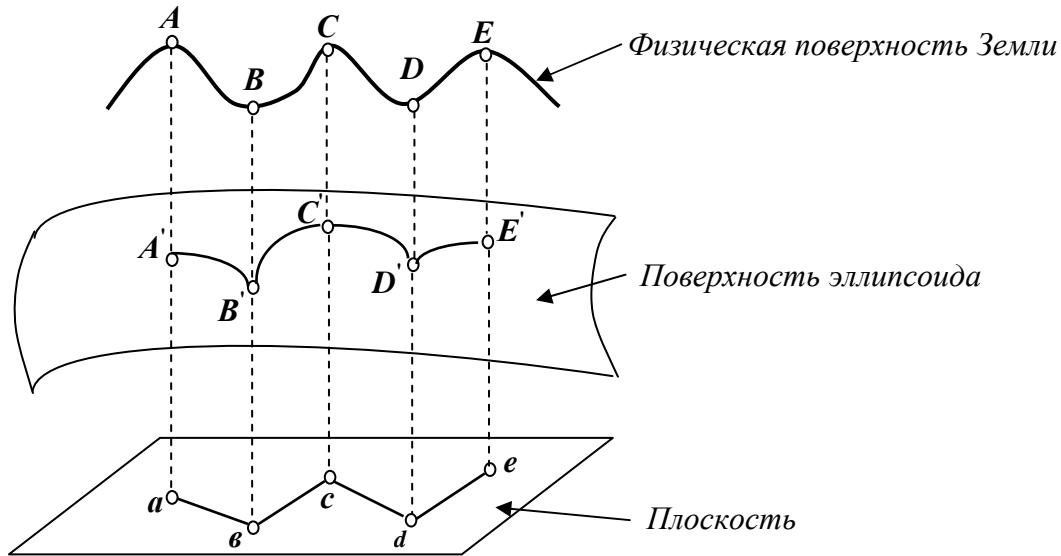


Рис. 2.3. Ортогональное проецирование точек

Если участок сферы S , примем за плоскость, соответствующую отрезку касательной $AC = d$, то будем иметь ошибку в горизонтальном расстоянии

$$\Delta d = d - S, \quad (2.2)$$

в вертикальном –

$$\Delta h = OC - OB. \quad (2.3)$$

Из рисунка 2.4 видно, что

$$d = R \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.4)$$

$$S = R \alpha, \quad (2.5)$$

где α – угол выражен в радианах.

Тогда

$$\Delta d = R (\operatorname{tg} \alpha - \alpha). \quad (2.6)$$

Известно, что $\operatorname{tg} \alpha = \alpha + \frac{1}{3} \alpha^3 + \frac{2}{15} \alpha^5 + \dots$.

Ограничиваясь первыми двумя членами этого убывающего ряда и пренебрегая последующими в виду их малости, получим

$$\Delta d = \frac{R \alpha^3}{3}. \quad (2.7)$$

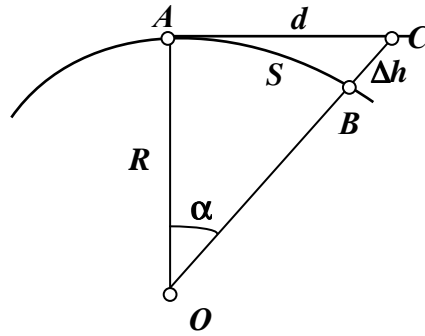


Рис. 2.4. Влияние кривизны Земли на измерение горизонтальных и вертикальных расстояний

Принимая во внимание, что $\alpha = S/R$, получим

$$\Delta d = \frac{S^3}{3R^2}. \quad (2.8)$$

Приняв $R \approx 6000$ км, $S = 10$ км, получим $\Delta d/S = 1/1000000$. Такая ошибка считается допустимой при наиболее точных измерениях расстояний на земной поверхности. Поэтому если изображаемый на плане участок земной поверхности не выходит за пределы круга радиусом 10 км, то соответствующую ему часть уроченной поверхности можно принять за плоскость. С увеличением расстояния ошибка Δd быстро увеличивается, т. к. она пропорциональна кубу расстояния.

Определим теперь величину ошибки Δh в вертикальном расстоянии без учета кривизны Земли.

Из треугольника OAC получим

$$R^2 + d^2 = (R + \Delta h)^2 = \Delta h (2R + \Delta h) + R^2. \quad (2.9)$$

Отсюда,

$$\Delta h = \frac{d^2}{2R}. \quad (2.10)$$

Подставляя в формулу (2.10) различные значения d , получим следующие погрешности Δh :

d , км	0,10	1,0	2,0	3,0	10,0
Δh , см	0,08	7,8	31	71	785

При инженерно-геодезических работах требуемая точность определения отметок характеризуется ошибками менее 1-2 см, поэтому влияние кривизны Земли на определение высот, как правило, учитывается.

2.3. Основные системы координат, применяемые в геодезии

Под координатами в общем смысле понимают числа, определяющие положение точки на плоскости, любой поверхности или в пространстве.

В геодезии под координатами понимают совокупность трех чисел, определяющих положение точки земной поверхности относительно некоторой исходной поверхности.

При определении координат точек земной поверхности в геодезии применяются следующие основные системы координат:

- система астрономических координат;
- система геодезических координат;
- система географических координат;
- система прямоугольных координат;
- зональная система координат в проекции Гаусса – Крюгера;
- система полярных координат.

Астрономические координаты. В системе астрономических координат положение точки определяется на уровенной поверхности (поверхности геоида) значениями *астрономических широты* φ и *долготы* λ , получаемых по наблюдениям небесных светил.

За начало отсчета координат в данной системе принимают плоскость экватора EQ , перпендикулярную к оси вращения Земли, и плоскость начального астрономического меридиана PM_0P_1 , в качестве которого принят Гринвичский меридиан (рис. 2.5).

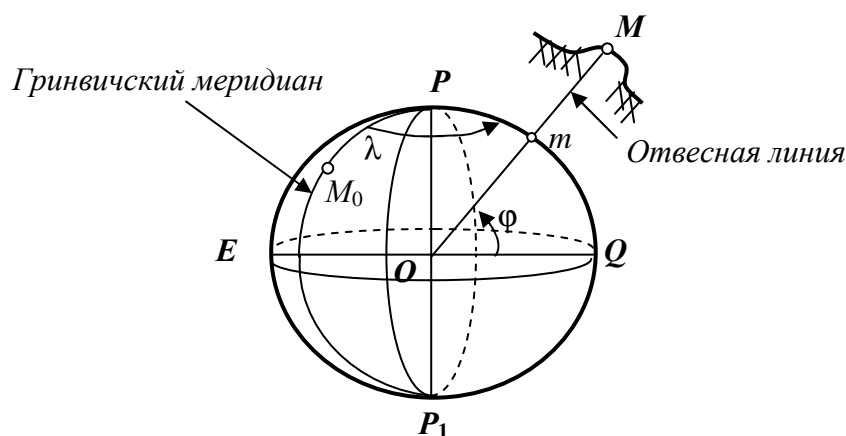


Рис. 2.5. Система астрономических координат

Астрономическая широта φ – угол, образованный отвесной линией MO в данной точке и плоскостью экватора. Широты отсчитываются к се-

веру и югу от экватора от 0° до 90° . Они называются *южными*, если точки расположены к югу от экватора, и *северными*, если точки расположены к северу от него.

Астрономическая долгота λ – двугранный угол между плоскостями астрономического меридиана данной точки PmP_1 и начального меридиана PM_0P_1 . Долготы отсчитывают в градусной мере от 0° до 180° или в часовой от нуля до 12 часов к востоку и западу от начального меридиана и называют *восточными* и *западными*.

Третьей координатой в этой системе координат является *ортометрическая* высота H_0 – высота точки M физической поверхности Земли над поверхностью геоида (см. рис. 2.5).

Геодезические координаты. Координатными плоскостями в этой системе координат являются плоскость экватора земного эллипсоида и плоскость Гринвичского меридиана, принятого за начальный (рис. 2.6).

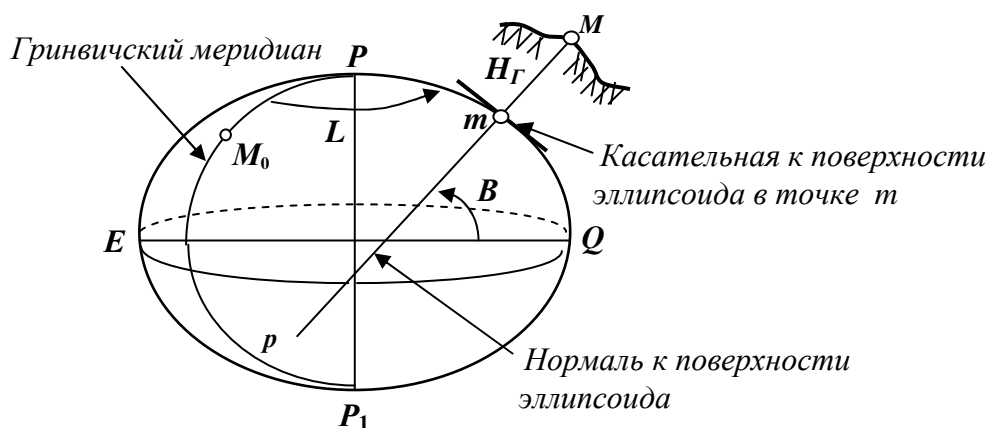


Рис. 2.6. Система геодезических координат

Плоскость экватора EQ проходит через центр эллипсоида O перпендикулярно к его оси вращения PP_1 . Плоскость PmP_1 , проходящая через нормаль Mr к поверхности эллипсоида в данной точке M , называется *плоскостью геодезического меридиана* этой точки. В качестве начального меридиана принят Гринвичский меридиан. В системе геодезических координат положение точки определяется на поверхности земного эллипсоида значениями геодезической широты B , геодезической долготы L и геодезической высоты H_g .

Геодезическая широта B точки M – угол между нормалью Mr к поверхности эллипсоида в данной точке и плоскостью экватора EQ .

Геодезическая долгота L точки M – двугранный угол между меридианом данной точки $PM P_1$ и начальным $PM_0 P_1$, в качестве которого принят Гринвичский меридиан.

Геодезические широта и долгота отсчитываются точно так же, как и астрономические.

Геодезическая высота H_G точки M (рис. 2.6) – расстояние по нормали от данной точки на физической поверхности до ее проекции на поверхность земного эллипсоида.

Географические координаты. Геодезические и астрономические координаты точек имеют между собой принципиальное различие, выражающееся несовпадением поверхностей геоида и эллипсоида. Это несовпадение выражается отклонением в данной точке отвесной линии от нормали к поверхности эллипсоида (рис. 2.1), которое может достигать нескольких секунд дуги. Этими различиями в системах координат при выполнении высокоточных геодезических работ не пренебрегают.

При выполнении же инженерно-геодезических работ, как правило, нет необходимости различать геодезические и астрономические координаты, вследствие чего пользуются более общим понятием – системой *географических координат*, в которой широта и долгота обозначаются соответственно φ и λ , полагая, что $B = \varphi$, а $L = \lambda$.

Таким образом, *систему географических координат* можно считать единой и обобщенной для всех точек земной поверхности, в которой уровенная поверхность принимается за поверхность шара, а за начало отсчета координат – начальный (Гринвичский) меридиан и плоскость экватора.

В инженерной геодезии, как правило, нет необходимости различать и изложенные выше системы высот.

При решении различных инженерно-геодезических задач пользуются понятиями *абсолютных, относительных и условных* высот точек.

В Республике Беларусь, как и в Российской Федерации, высоты точек земной поверхности отсчитываются от среднего многолетнего уровня Балтийского моря. Эта система высот называется *Балтийской*.

Абсолютная высота H_A точки A (рис. 2.7) – расстояние, измеряемое от уровня моря до данной точки.

Расстояние H'_A , измеряемое от произвольной уровенной поверхности до данной точки, называется ее *условной высотой*.

Разность высот двух точек называется *относительной высотой* или *превышением*, обозначаемым через h .

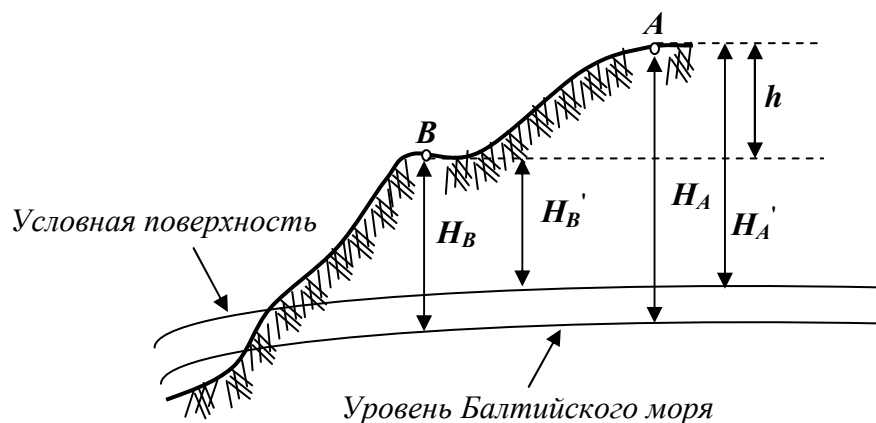


Рис. 2.7. Система отсчета высот

Местная система прямоугольных координат. Местная система прямоугольных координат применяется для определения координат точек на сравнительно небольших участках земной поверхности. Уровенная поверхность принимается за горизонтальную плоскость, перпендикулярную к отвесной линии, проходящей через начало координат. Основными координатными линиями в этой системе координат являются две взаимно перпендикулярные линии с началом в точке их пересечения O (рис. 2.8), называемые осями абсцисс X и ординат Y .

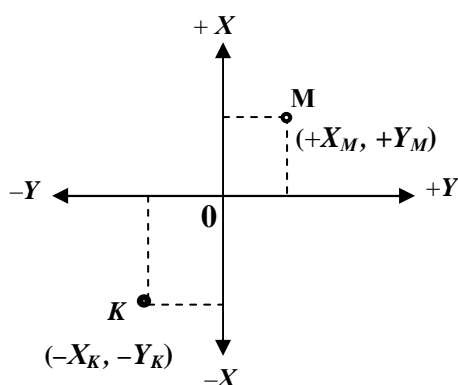


Рис. 2.8. Система прямоугольных координат

Северное направление оси абсцисс считается положительным (+), а южное – отрицательным (-). Направление оси ординат считается положительным к востоку и отрицательным к западу.

Оси координат делят плоскость на четыре части, называемые четвертями: I – СВ, II – ЮВ, III – ЮЗ, IV – СЗ.

Положение точки в этой системе координат определяется значениями абсциссы X и ординаты Y с соответствующим знаком в зависимости от четверти, в которой находится точка.

Зональная система координат в проекции Гаусса – Крюгера. В целях решения многообразных народно-хозяйственных задач необходимо изображать на плоскости (листе бумаги) значительные территории земной поверхности, для чего необходима картографическая проекция, обеспечивающая сохранение подобия фигур при переходе с шарообразной земной поверхности на плоскость. Возникающие при этом искажения размеров фигур должны быть малы и легко учитываться.

Этим требованиям удовлетворяет равноугольная поперечно-цилиндрическая проекция, предложенная К. Гауссом, математически разработанная И. Крюгером (он вывел рабочие формулы проекции) и принятая в СССР в 1928 г. Вышеназванная проекция применяется в Республике Беларусь в настоящее время. Изображение шарообразной земной поверхности на плоскости в этой проекции получают следующим образом.

Поверхность земного шара делят меридианами на шести- или трехградусные зоны (рис. 2.9) и проводят внутри каждой зоны *осевой* меридиан. Счет зон ведется от Гринвичского меридиана. При делении земного шара на шестиградусные зоны их число будет равно 60.

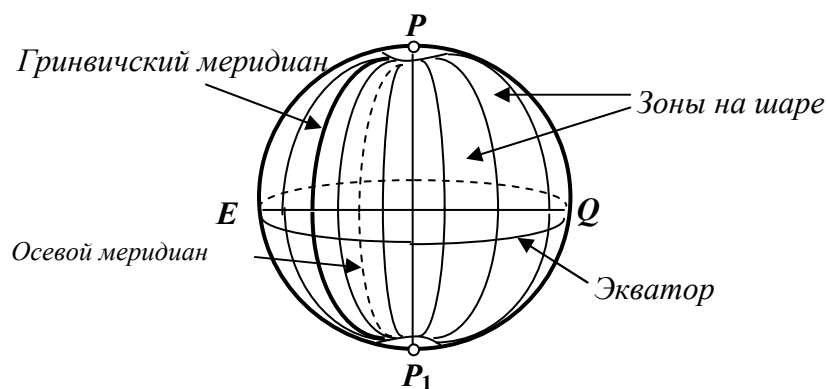


Рис. 2.9. Деление шара на зоны

Затем шар с нанесенными зонами располагают внутри цилиндра таким образом, чтобы экватор EQ был совмещен с осью цилиндра, а осевой меридиан первой зоны – с боковой поверхностью цилиндра. Проецируют первую зону из центра шара на боковую поверхность цилиндра (рис. 2.10).

Далее перемещают шар вдоль оси цилиндра на расстояние, равное ширине зоны, поворачивают вокруг оси PP_1 до совмещения осевого мери-

диана второй зоны с боковой поверхностью цилиндра и проецируют эту зону на цилиндр. Аналогично проецируют на цилиндр все остальные зоны.

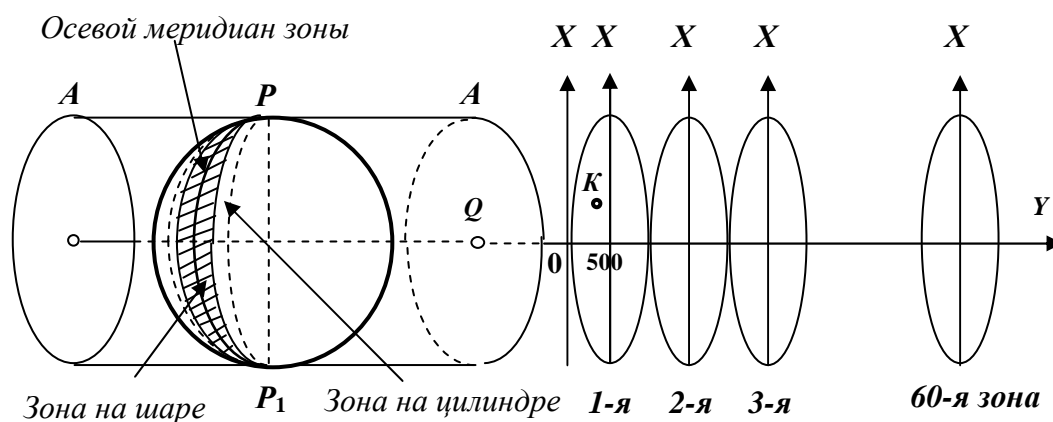


Рис. 2.10. Проецирование зон на боковую поверхность цилиндра

Разрезав цилиндр по образующей AA и развернув его, получают на плоскости изображение всех зон шара, соприкасающихся между собой.

Каждая зона, изображенная на плоскости, имеет свою систему прямоугольных координат, начало которой находится в точке пересечения осевого меридиана зоны, принимаемого за ось абсцисс X , с экватором, принимаемым за ось ординат Y .

Абсциссы, отсчитываемые к северу от экватора, считаются положительными, а к югу от него – отрицательными. Значения ординат отсчитываются от осевого меридиана зоны к востоку и западу. Ординаты, отсчитываемые к востоку, – положительные, к западу – отрицательные.

Так как территория Республики Беларусь расположена в северном полушарии, то абсциссы для всех точек будут положительными. Например, точка с абсциссой $X = 6\ 234\ 123$ м находится на указанном удалении к северу от экватора.

Значения ординат – могут быть и положительными, и отрицательными. Чтобы избежать отрицательных значений ординат, ординату осевого меридиана принимают не за ноль, а за 500 км, т.е. начало отсчета ординат искусственно переносят к западу на 500 км. Такие координаты называют – *преобразованными*. Для того чтобы определить, в какой зоне находится точка, перед значением ординаты указывается номер зоны, а затем удаление от условного начала отсчета в зоне. Например, точка K , имеющая ординату $Y = 5345750$, находится в 5-й зоне на удалении 345750 м от ус-

ловного начала отсчета или на удалении ($345750 - 500000 = -154250$ м) к западу от осевого меридиана.

В результате проецирования зон из центра шара на поверхность цилиндра возникают погрешности в их изображении (на цилиндре зоны шире, чем на шаре). Кроме того, имеют место и искажения в длинах линий в зависимости от их удаления от осевого меридиана. Вследствие этого картографирование земной поверхности выполняется с некоторыми погрешностями.

Из картографии известно, что на поверхности шара длина линии S получает искажение ΔS , выражаемое формулой

$$\Delta S = Y_m^2 S / 2R^2, \quad (2.11)$$

где Y_m – среднее значение ординат начальной и конечной точек линии;
 R – радиус Земли ($R = 6371$ км);
 S – длина измеряемой линии.

Полагая, что наибольшее значение $Y_m = 250$ км, зная $R = 6371$ км, ошибка в измеренной линии ΔS не превысит 50 см при длине $S = 500$ м. Это позволяет утверждать, что картографирование в проекции Гаусса осуществляется с искажениями, практически не влияющими на точность изображения местности на карте.

Полярные координаты. Систему полярных координат применяют при определении планового положения точек на небольших участках местности в процессе съемки и при геодезических разбивочных работах.

В этой системе координат положение точки определяется относительно полюса Q и направления полярной оси QA (рис. 2.11).

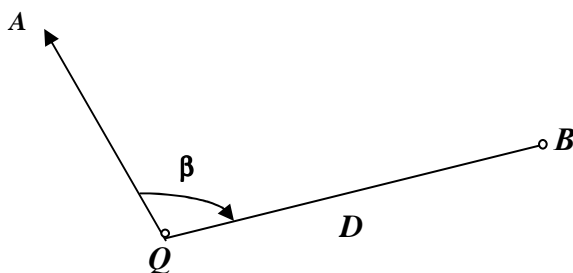


Рис. 2.11. Система полярных координат

Полярными координатами точки B будут полярный угол β и полярное расстояние D .

ТЕМА 3. ОРИЕНТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ. ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ НА ПЛОСКОСТИ

3.1. Углы ориентирования

При выполнении геодезических работ на местности, работ с картой или планом необходимо определять положение линии (ориентировать линию) относительно сторон света или какого-нибудь положения, принятого за исходное.

Ориентировать линию – значит определить ее направление относительно другого направления, принятого за исходное.

В качестве исходных направлений в геодезии принимаются [5]:

- северное направление истинного (географического) меридиана;
- северное направление магнитного меридиана;
- направление оси абсцисс X системы плоских прямоугольных координат.

Угол, измеряемый по ходу часовой стрелки от северного направления истинного меридиана до заданного направления, называется истинным (географическим) азимутом или просто азимутом.

Значения азимута лежат в пределах от 0° до 360° . На рисунке 3.1, *a* приняты обозначения: C – северное направление меридиана, угол A_1 – азимут направления на точку 1 и A_2 – азимут направления на точку 2.

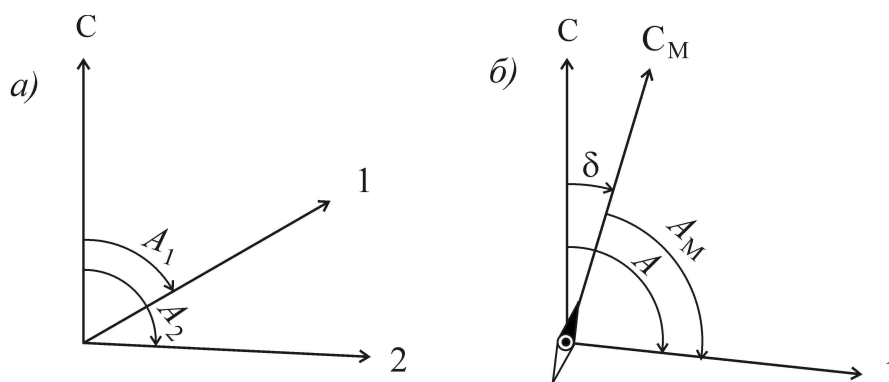


Рис. 3.1. Углы ориентирования:
a – азимуты географические; *б* – магнитный азимут

Истинные азимуты линий местности определяются путем астрономических наблюдений с помощью специальных приборов – гиротеодолитов или GPS-приемников.

Угол, отсчитываемый по ходу часовой стрелки от северного направления магнитной стрелки до заданного направления, называется магнитным азимутом.

Магнитная стрелка компаса совпадает с положением магнитного меридиана и отклоняется от направления истинного меридиана на угол δ , который называется *склонением магнитной стрелки* (рис. 3.1, б).

Если северный конец магнитной стрелки отклоняется от меридиана к востоку, то склонение называют восточным и считают положительным, если – к западу, то называют западным и считают отрицательным.

Азимут с магнитным азимутом связывает формула

$$A = A_M + \delta,$$

где A – азимут; A_M – магнитный азимут; δ – склонение магнитной стрелки (может быть положительным $+\delta$ или отрицательным $-\delta$).

Магнитные азимуты в геодезии измеряют буссолью как отдельным прибором (рис. 3.2) или теодолитом с прикрепленной к нему ориентир-буссолью. Однако точность этих измерений невысока (несколько минут). Склонение магнитной стрелки непостоянно. Оно изменяется во времени, испытывая суточные, годовые и вековые изменения. Кроме этого, на склонение могут оказывать влияние различные магнитные аномалии.

Углом ориентирования, применяемым при использовании любых систем плоских прямоугольных координат, а также системы плоских прямоугольных координат Гаусса – Крюгера, является дирекционный угол.

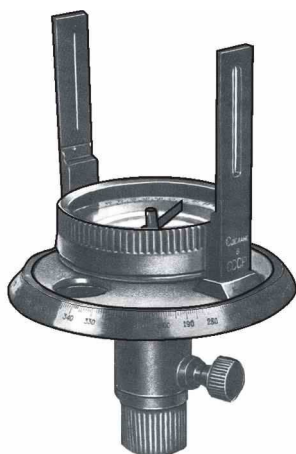


Рис. 3.2. Буссоль

Угол, отсчитываемый по ходу часовой стрелки, от положительного (северного) направления оси абсцисс до заданного направления называется дирекционным углом (рис. 3.3).

Для государственных топографических карт и планов угол γ между северным направлением меридиана и направлением оси абсцисс X прямоугольных координат (т. е. линией параллельной осевому меридиану) называется *сближением меридианов*.

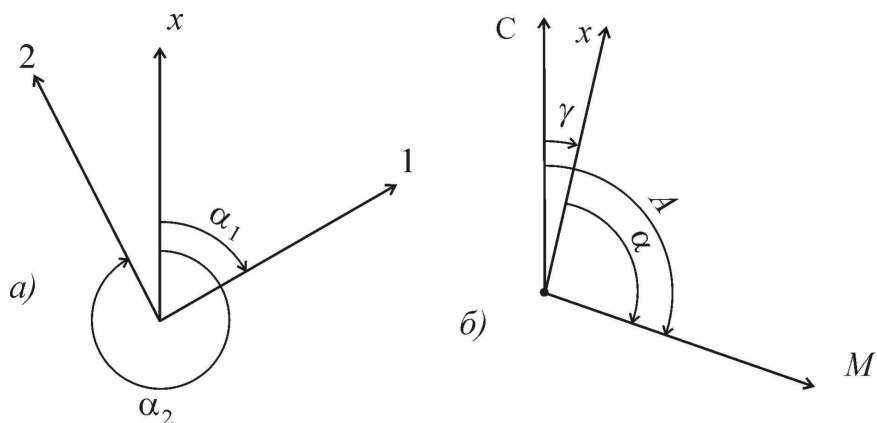


Рис. 3.3. Углы ориентирования:

a – дирекционные углы α_1, α_2 ; *б* – азимут A и дирекционный угол α

При отклонении оси абсцисс от меридиана к востоку, сближение меридианов считают положительным $+\gamma$, а при отклонении к западу – отрицательным $-\gamma$. При этом справедлива формула (рис. 3.3 б)

$$A = \alpha + \gamma,$$

где α – дирекционный угол; γ – сближение меридианов.

Приблизительно сближение меридианов равно

$$\gamma = \Delta\lambda \sin\varphi,$$

где $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, причем λ – долгота географического данной точки и λ_0 – долгота осевого меридиана; φ – широта точки.

На рисунке 3.4 показано соотношение между азимутами и дирекционными углами в пределах одной координатной зоны.

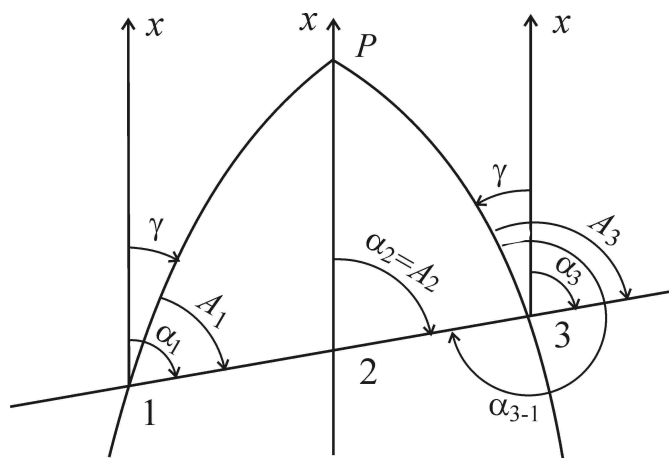


Рис. 3.4. Связь между азимутами и дирекционными углами:

1 – в западной половине зоны; 2 – на осевом меридиане; 3 – в восточной половине зоны; P – полюс; $1P, 3P$ – меридианы; $2P$ – осевой меридиан

Легко заметить, что для точек, расположенных к востоку от осевого меридиана зоны, сближение меридианов положительное, а к западу – отрицательное. При этом дирекционные углы в разных точках прямой линии равны $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$. Поэтому обратный дирекционный угол в точке 3 отличается от прямого в точке 1 ровно на 180° , то есть $\alpha_{1-3} = \alpha_{3-1} \pm 180^\circ$. Азимуты же в разных точках прямой различаются: $A_1 \neq A_2 \neq A_3$, что обусловлено различием сближения меридианов. Поэтому $A_{1-3} \neq A_{3-1} \pm 180^\circ$.

При использовании местной системы прямоугольных координат направление оси абсцисс x не связано с направлением осевого меридиана координатной зоны, и тогда дирекционные углы отсчитывают от положительного направления оси абсцисс x .

Направления могут быть прямыми и обратными. Соответственно и дирекционные углы и азимуты направлений бывают прямыми и обратными.

Зависимость между прямым и обратным дирекционными углами выражается соотношением

$$\alpha_{пр} = \alpha_{обр} \pm 180^\circ.$$

В практике вычислений находят применение также вспомогательные углы ориентирования – румбы. *Румбом* называют острый угол, измеряемый от ближайшего направления меридиана (северного или южного) до заданного направления. Румбу приписывают название координатной четверти (СВ, ЮВ, ЮЗ, СЗ), в которой расположено заданное направление. Например, для $\alpha = 240^\circ 36'$ румб равен $r = \text{ЮЗ}: 60^\circ 36'$. Румбы могут быть истинные, магнитные и дирекционные.

В таблице 3.1 приведены соотношения между румбами и дирекционными углами.

Таблица 3.1

Знаки		Четверть	Формулы
ΔX	ΔY		
+	+	I - СВ	$\alpha_I = r_I$
-	+	II - ЮВ	$\alpha_{II} = 180^\circ - r_{II}$
-	-	III - ЮЗ	$\alpha_{III} = 180^\circ + r_{III}$
+	-	IV - СЗ	$\alpha_{IV} = 360^\circ - r_{IV}$

3.2. Прямая и обратная геодезические задачи на плоскости

При вычислительной обработке выполненных на местности измерений, а также при проектировании инженерных сооружений и расчетах для перенесения проектов в натуру возникает необходимость решения прямой и обратной геодезических задач.

Прямая геодезическая задача. По известным координатам x_1 и y_1 точки 1, дирекционному углу α_{1-2} и расстоянию d_{1-2} требуется вычислить ее координаты x_2, y_2 .

Координаты точки 2 вычисляются по формулам (рис. 3.5):

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 + \Delta x; \\y_2 &= y_1 + \Delta y;\end{aligned}\tag{3.1}$$

где $\Delta x, \Delta y$ – приращения координат, равные

$$\begin{aligned}\Delta x &= d_{1-2} \cdot \cos \alpha_{1-2}; \\ \Delta y &= d_{1-2} \cdot \sin \alpha_{1-2}.\end{aligned}\tag{3.2}$$

Обратная геодезическая задача. По известным координатам x_1, y_1 точки 1 и x_2, y_2 точки 2 требуется вычислить расстояние между ними d_{1-2} и дирекционный угол α_{1-2} .

Из формул (3.2) и рис. 3.5 видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha_{1-2} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\tag{3.3}$$

$$d_{1-2} = \frac{y_2 - y_1}{\sin \alpha_{1-2}} = \frac{x_2 - x_1}{\cos \alpha_{1-2}} = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}.\tag{3.4}$$

Программами решения прямых и обратных геодезических задач снабжены, в частности, электронные тахеометры, что дает возможность непосредственно в ходе полевых измерений определять координаты наблюдаемых точек, вычислять углы и расстояния для разбивочных работ.

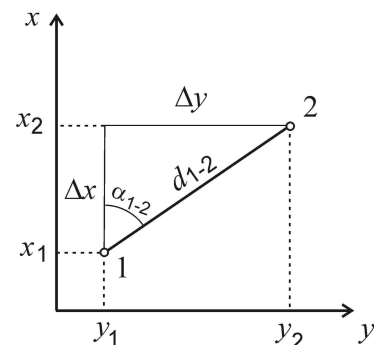


Рис. 3.5. К решению прямой и обратной геодезических задач

ТЕМА 4. ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ПЛАНЫ И КАРТЫ

4.1. План, карта, цифровая модель местности

Топографическим планом называется уменьшенное подобное изображение горизонтальной проекции небольшого участка местности на плоскости.

Для составления плана местности расположенные на ней точки проецируют на уровенную поверхность по направлению отвесных линий. Ввиду малости участка отвесные линии оказываются практически параллельными, а фрагмент уровенной поверхности может рассматриваться как плоскость. Полученную проекцию местности уменьшают и изображают на плане. Степень уменьшения характеризуется масштабом плана.

Масштабом называется отношение длины отрезка на плане к длине горизонтальной проекции соответствующего отрезка местности. Масштаб записывают в виде дроби с числителем, равным единице, и знаменателем, показывающим, во сколько раз уменьшены на плане длины линий. Наряду с представлением масштаба в виде дроби (численного масштаба) пользуются именованным масштабом (словесным описанием), например: «в одном сантиметре 20 метров», что соответствует масштабу 1:2000.

Для измерения расстояний на плане, под его нижней рамкой, помещают линейный масштаб (рис. 4.1), на котором несколько раз отложено одно и то же расстояние, называемое основанием масштаба и равное обычно 2 см. Крайнее левое основание делят на более мелкие отрезки. Деления линейного масштаба оцифровывают в метрах.

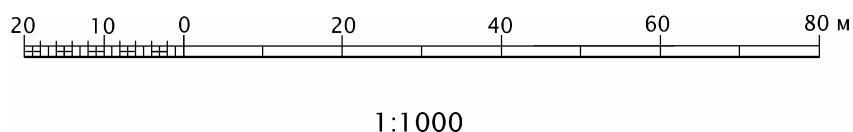


Рис. 4.1. Линейный масштаб

Топографические планы (1:500 – 1:5000) – результат полевых инструментальных съемок. Планы создают при любом строительстве и выполнении землеустроительных работ. Их генерализация минимальна, содержание по возможности приближено к местным условиям. Топографические планы создают также многие хозяйственные ведомства для своих нужд.

Географической картой называют математически определенное, уменьшенное, обобщенное (генерализованное) изображение земной по-

верхности, показывающее расположенные или спроецированные на них объекты в принятой системе условных знаков.

Для изготовления карты объекты местности проецируют на поверхность земного эллипсоида и полученное изображение переносят на плоскость. Такой перенос невозможно выполнить без искажений. Неизбежно возникают деформации – сжатия и растяжения, различные по величине и направлению. Какими будут искажения, определяется *картографической проекцией* – законом перехода от геодезических (географических) координат объектов к плоским координатам карты.

По характеру искажений проекции могут быть равноугольными, равновеликими и произвольными. В геодезии чаще всего пользуются равноугольными (или иначе – конформными) проекциями, сохраняющими без искажений углы и очертания малых объектов.

Проекции различаются также по виду изображения на них меридианов и параллелей. Основными вспомогательными поверхностями при переходе от эллипсоида или шара к карте могут быть цилиндр, конус, плоскость.

В *цилиндрических* проекциях меридианы изображаются равноотстоящими параллельными прямыми, параллели – также в виде прямых, перпендикулярных к меридианам.

В *конических* проекциях меридианы изображаются прямыми, расходящимися под углами пропорциональными разностям долгот, а параллели – дуги концентрических окружностей с центром в точке схода меридианов.

Если углы между изображениями прямолинейных меридианов равны разностям долгот, а параллели в виде концентрических окружностей, то проекции называются *азимутальными*.

По содержанию географические карты подразделяются на следующие группы: общегеографические, тематические, специальные.

Общегеографические карты – это карты, на которых изображаемым видимым объектам и всем другим элементам содержания уделяется равное внимание. Дальнейшая классификация общегеографических карт совпадает с делением их по масштабу:

- *топографические* карты – в масштабах 1:100 000 и крупнее;
- *обзорно-топографические* – в масштабах 1:200 000 – 1:1000 000;
- *обзорные* – мельче 1:1000 000.

Тематические карты – группа карт природных и общественных явлений, их сочетаний и комплексов. Содержание карт определяется конкретной темой, которой уделяется основное внимание, в ущерб другим элементам содержания.

Специальные карты – чаще всего это карты технического назначения: навигационные, кадастровые и др.

Для нужд инженерной геодезии в любом государстве наиболее важны и имеют применение топографические карты. Математическая основа топографических карт закреплена законодательно. В Республике Беларусь их издают в равноугольной поперечно-цилиндрической проекции Гаусса – Крюгера – проекции, в которой прямыми линиями без искажений изображаются осевой меридиан зоны и экватор. Остальные меридианы и параллели изображаются кривыми линиями.

В условиях применения компьютерных технологий наряду с изображениями местности на бумажных носителях (карты и планы) используются их цифровые аналоги.

Цифровой моделью местности (ЦММ) называется представленное в виде цифровых кодов и хранимое на магнитных носителях логико-математическое описание местности, адекватное по содержанию плану местности. Основным содержанием ЦММ является топографическая информация: координаты и высоты точек, очертания объектов, их свойства. Цифровая модель местности содержит и общую информацию – название участка, систему координат и высот и др.

Цифровой картой называют цифровую модель значительного участка земной поверхности, сформированную с учетом генерализации изображаемых объектов и принятой картографической проекции.

Электронной картой называется изображение местности на экране дисплея, полученное на основе цифровой карты.

4.2. Разграфка и номенклатура топографических карт и планов

Топографические карты издают на листах со сторонами 40 – 50 см. В основу разграфки (нарезки) карт положена карта масштаба 1:1000000. Она издается на листах размерами 4° по широте и 6° по долготе. Множество листов такой карты по направлению параллелей образует ряды шириной по 4°, а по направлению меридианов – колонны шириной по 6°.

Ряды обозначают заглавными буквами латинского алфавита *A, B, C, D, ..., Z*, начиная от экватора по направлениям к северу и югу (табл. 4.1). Колонны нумеруют арабскими цифрами 1, 2, ..., 60, начиная от меридиана 180° в направлении с запада на восток [14].

Таблица 4.1

Обозначение ряда	Границы ряда по широте	Обозначение ряда	Границы ряда по широте	Обозначение ряда	Границы ряда по широте
<i>A</i>	0° – 4°	<i>I</i>	32° – 36°	<i>Q</i>	64° – 68°
<i>B</i>	4 – 8	<i>J</i>	36 – 40	<i>R</i>	68 – 72
<i>C</i>	8 – 12	<i>K</i>	40 – 44	<i>S</i>	72 – 76
<i>D</i>	12 – 16	<i>L</i>	44 – 48	<i>T</i>	76 – 80
<i>E</i>	16 – 20	<i>M</i>	48 – 52	<i>U</i>	80 – 84
<i>F</i>	20 – 24	<i>N</i>	52 – 56	<i>Y</i>	84 – 88
<i>G</i>	24 – 28	<i>O</i>	56 – 60	<i>Z</i>	88 – 90
<i>H</i>	16 – 20	<i>P</i>	60 – 64		

Каждому листу карты масштаба 1:1000000 присвоен номенклатурный номер, состоящий из буквы соответствующего ряда и номера колонны, например, *N-35*.

Для карт масштаба 1:500000 лист масштаба 1:1000000 меридианом и параллелью делят на 4 листа, обозначая их прописными буквами *A, Б, В, Г*. Номенклатурные номера листов карты образуют добавлением соответствующей буквы к номенклатурному номеру листа масштаба 1:1000000 (например, *N-35-Г*).

Для карт масштаба 1:200000 лист масштаба 1:1000000 делят на 36 листов, нумеруя их римскими цифрами *I, II, ..., XXXVI*.

Для карт масштаба 1:100000, разделив лист масштаба 1:1000000 по широте и долготе на 12 частей, получают границы 144 листов (рис. 4.2, *a*), которые нумеруют цифрами 1, 2, ..., 144. Номенклатура каждого листа складывается из номенклатуры листа масштаба 1:1000000 и номера листа.

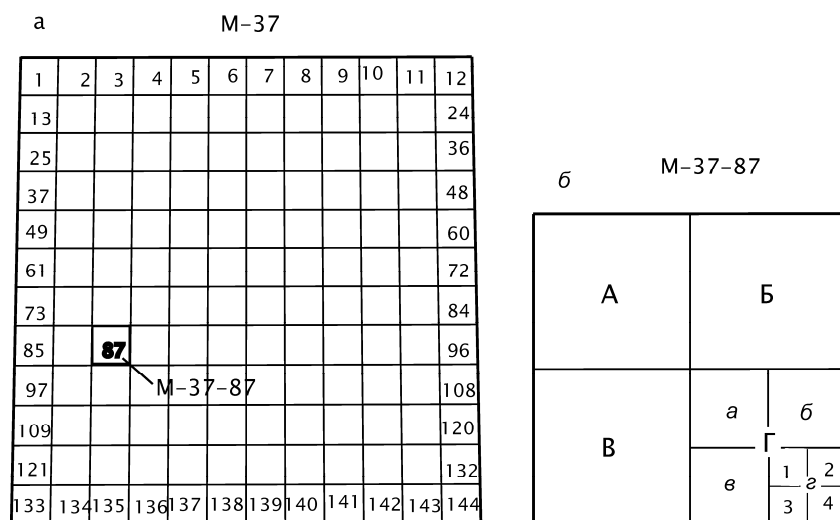


Рис. 4.2. Разграфка листов карт масштабов:
a – 1:100000; *б* – 1:50000, 1:25000, 1:10000

Разграфка карт масштабов 1:50000, 1:25000 и 1:10000 формируется делением на четыре части листа более мелкого масштаба (соответственно 1:100000, 1:50000, 1:25000) и добавлением к номенклатуре предыдущего масштаба соответствующего знака, как показано на рис. 4.2, б и в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Масштаб	Номенклатура (последнего листа карты)	Число листов карты	Размеры листа	
			по широте	по долготе
1:1000000	<i>N-35</i>	–	4°	6°
1:100000	<i>N-35-144</i>	12 × 12 = 144	20′	30′
1:50000	<i>N -35-144-Г</i>	2 × 2 = 4	10′	15′
1:25000	<i>N -35-144-Г-2</i>	2 × 2 = 4	5′	7′30″
1:10000	<i>N -35-144-Г-2-4</i>	2 × 2 = 4	2′30″	3′45″

На рисунке 4.2 выделен лист М–37–87.

Для планов масштабов 1:5000 и 1:2000 применяется два вида разграфки – трапециевидная, в которой рамками планов служат параллели и меридианы, и прямоугольная, в которой рамки совмещают с линиями сетки прямоугольных координат.

При трапециевидной разграфке границы листов планов масштаба 1:5000 получают делением листа масштаба 1:100000 на 256 частей (16×16), которые нумеруют от 1 до 256. Номенклатура, например, листа №70, записывается так N –35–87(70).

Разграфку листов масштаба 1:2000 получают делением листа масштаба 1:5000 на 9 частей (3×3) и обозначают добавлением буквы русского алфавита, например, N –35–87(70-и).

Прямоугольная разграфка применяется для планов населенных пунктов и для участков площадью менее 20 км², а также для планов масштабов 1:1000 и 1:500.

При съемке отдельного участка план может быть составлен и на листе нестандартного формата.

4.3. Условные знаки топографических карт и планов

Рамки карты и координатные линии. Листы топографических карт имеют три рамки: внутреннюю, минутную и внешнюю. Внутреннюю рамку образуют отрезки параллелей, ограничивающих площадь карты с севера и юга, и отрезки меридианов, ограничивающих ее с запада и востока.

Значения широт и долгот на линиях внутренней рамки связаны с номенклатурой карты и написаны в каждом ее углу.

Между внутренней и внешней рамками помещена минутная рамка, на которой нанесены деления, соответствующие одной минуте широты (слева и справа) и долготы (наверху и внизу). Точками на рамке отмечены десятки секунд.

Система прямоугольных координат на карте представлена километровой сеткой, образованной проведенными через 1 км (расстояние на местности) координатными линиями x и y . Значения x и y , выраженные в километрах, надписаны на выходах линий за внутреннюю рамку карты.

Планы масштабов 1:5000 – 1:500 с прямоугольной разграфкой имеют только сетку прямоугольных координат. Ее линии проведены через 10 см (расстояние на плане).

Условные знаки. На планах и картах разные объекты местности, совокупность которых называется *ситуацией*, изображают образно-знаковыми символами, называемыми *условными знаками* [15]. Это язык карты.

Условные знаки, обязательные для всех учреждений и организаций, составляющих топографические карты и планы, унифицированы и издаются либо отдельно для каждого масштаба, либо для группы масштабов. Знаки внешне напоминают вид и характер изображаемых объектов, поэтому легко запоминаются.

Различают следующие группы условных знаков: площадные (контурные), внемасштабные и линейные.

Контурными (площадными) условными знаками изображают объекты, форма и размеры которых могут быть переданы в масштабе плана (карты). К ним относятся земельные угодья (леса, сады, пашни, луга), водоемы, а для более крупных масштабов – здания, сооружения. Очертания объектов (контур) на плане показывают точечным пунктиром или линиями определенной толщины и цвета. Внутри контура помещают знаки, указывающие характер объекта.

Внемасштабными условными знаками изображают объекты, которые необходимо нанести на план, но невозможно изобразить в масштабе (бензоколонки, колодцы, дорожные знаки, столбы, отдельно стоящие деревья, пункты геодезической сети и др.). Внемасштабные знаки определяют местоположение объектов, но по ним нельзя судить об их размерах.

Линейными условными знаками изображают объекты, длина которых выражается в масштабе плана, а ширина не выражается (линии электропередач и связи, трубопроводы, ограды, тропы).

Для отражения характеристик изображаемых объектов многие условные знаки сопровождаются *надписями*. Надписи на топографических картах подразделяются на топонимы и пояснительные подписи.

Топонимы – собственные географические наименования объектов картографирования (г. Лысая, р. Полота, с. Евнино).

Пояснительные надписи поясняют изображаемые объекты, указывают их количественные и качественные характеристики, служат для получения справочных сведений. Так, при изображении железной дороги указывают высоту насыпи и глубину выемки, ширину колеи на узкоколейной дороге. При изображении шоссе указывают его ширину и материал покрытия; при изображении линий связи – число проводов и их назначение; при изображении лесов – породу деревьев, среднюю высоту, толщину стволов и расстояние между деревьями. Абсолютные и относительные высоты и глубины, скорость течения воды в реке и др.

Чтобы придать карте или плану большую наглядность, для изображения элементов содержания используют цвета: для рек, озер, каналов заболоченных участков – синий; для лесов, садов – зеленый; для шоссе дорог – красный; для улучшенных грунтовых дорог – оранжевый. Остальная ситуация изображается черным цветом.

Изображение рельефа. *Рельефом местности* называется совокупность неровностей земной поверхности. Рельеф земной поверхности является главным элементом ландшафта и образует сплошное непрерывное и изменяющееся поле высот.

В зависимости от характера рельефа местность подразделяют на равнинную, всхолмленную и горную.

Все разнообразие рельефа земной поверхности сводится к пяти основным формам: гора, котловина, хребет, лощина и седловина.

Гора (холм, курган, сопка) – это возвышающаяся над окружающей местностью конусообразная форма рельефа, наивысшая точка которой называется вершиной. Вершина в виде площадки называется плато, вершина остrokонечной формы – пиком. Боковая поверхность горы состоит из скатов, линия слияния их с окружающей местностью – подошва или основание горы (рис. 4.3, а).

Котловина (впадина) – углубление в виде чаши. Самая низкая точка котловины – дно. Боковая поверхность ее состоит из скатов, линия слияния их с окружающей местностью – бровка (рис. 4.3, б).

Хребет – вытянутая возвышенность постепенно понижающаяся в одном направлении и имеющая два крутых ската, называемых склонами. Ось хребта между склонами называется водораздельной линией или водоразделом (рис. 4.3, в).

Лощина – вытянутое углубление местности, понижающееся в одном направлении. Ось лощины между двумя скатами, по которой сбегает вода, называется водосливной линией или тальвегом. Разновидности лощины – долина, ущелье, промоина, овраг, балка. Расположенные иногда по склонам лощин площадки, имеющие вид уступа или ступени с почти горизонтальной поверхностью, называются террасами (рис. 4.3, г).

Седловина (в горах перевал) – понижение между двумя возвышенностями (рис. 4.3, д). По обе стороны к седловине примыкают лощины. Седловина – это место пересечения водораздельной и водосливной линий.

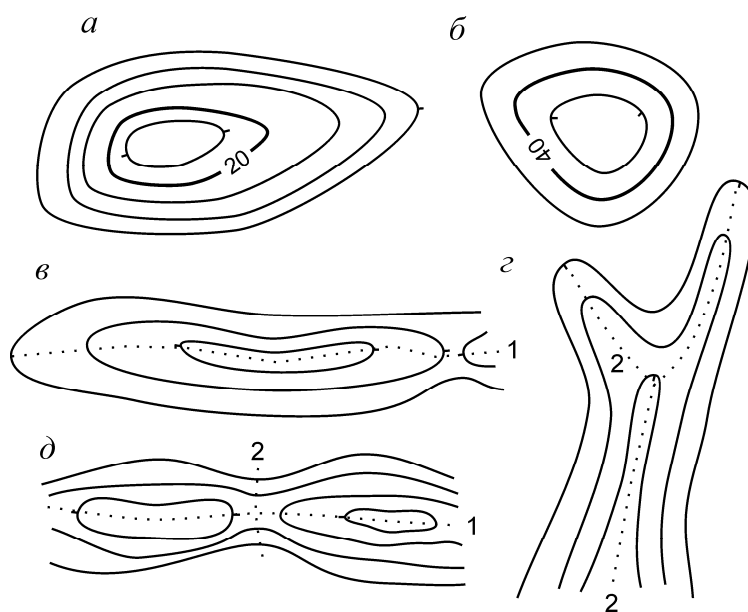


Рис. 4.3. Основные формы рельефа: а – гора; б – котловина; в – хребет; г – лощина; д – седловина; 1 – водораздельная линия; 2 – линия тальвега

Вершина горы, дно котловины и самая низкая точка седловины – это *характерные точки рельефа*. Водораздел и тальвег представляют собой *характерные линии рельефа*. Характерные точки и линии рельефа облегчают распознавание отдельных форм его на местности и изображение их на карте и плане.

Способ изображения рельефа на планах и картах должен давать возможность судить о направлении и крутизне скатов, а также определять высотные отметки точек местности. Вместе с тем он должен быть наглядным.

Из всего разнообразия изображения рельефа, на топографических картах и планах наиболее целесообразно изображать рельеф с помощью горизонталей, в сочетании с надписями высотных отметок характерных точек и условными знаками.

*Горизонтал*и – линии сечения земной поверхности равноотстоящими уровнями поверхностями. Иными словами, горизонталы – это линии равных высот. Горизонталы, подобно другим точкам местности, проецируют на уровенную поверхность Q и наносят на план или карту (рис. 4.4).

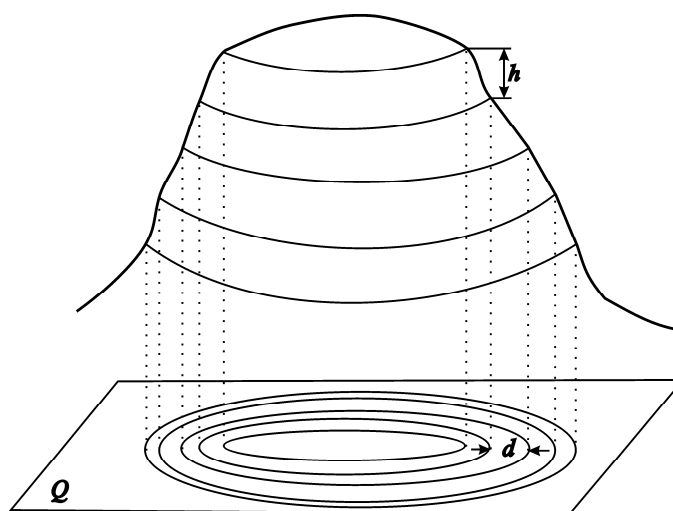


Рис. 4.4. Горизонталы: h – высота сечения рельефа; d – заложение

Разность h высот смежных горизонталей, равная расстоянию между секущими поверхностями, называется *высотой сечения рельефа*. Значение высоты сечения подписывают у нижней рамки плана.

Горизонтальное расстояние между соседними горизонталями называется *заложением*. Минимальным в данном месте является заложение, перпендикулярное к горизонталям, – *заложение ската*. Чем меньше заложение ската, тем круче скат. *Горизонталы никогда не пересекаются*.

Направление ската указывают *бергштрихами* – короткими штрихами у некоторых горизонталей, направленными в сторону понижения рельефа. На отдельных горизонталях в их разрывах пишут их высоту так, чтобы верх цифр указывал в сторону подъема.

Для облегчения распознавания форм рельефа и определения отметок точек каждую четвертую или пятую горизонтали на карте утолщают, а для отражения деталей рельефа используют *полугоризонталы* – штриховые линии, соответствующие половине высоты сечения рельефа, а также *вспомогательные горизонталы* с короткими штрихами, проводимые на произвольной высоте.

Изображение рельефа горизонталями дополняется вписыванием на план отметок высот около характерных точек рельефа и специальными условными знаками, изображающими обрывы, скалы, овраги и т. п.

4.4. Решение задач по топографической карте

Измерение расстояний на картах и планах. Для измерения расстояния на карте его берут раствором циркуля-измерителя и переносят на помещенный под южной рамкой карты линейный масштаб. Более точно расстояние измеряют линейкой с миллиметровыми делениями. Отсчет по линейке, выраженный в сантиметрах, умножают на число метров, указанное в именованном масштабе карты.

Еще точнее измерения выполняются с применением *поперечного масштаба* (рис. 4.5). На металлической линейке через m интервалов выгравированы параллельные линии – горизонталы (обычно $m = 10$). К ним восставлены перпендикуляры – вертикали, расстояние между которыми называют основанием масштаба δ (обычно $\delta = 2$ см). Крайнее левое основание разделено на n частей и через полученные точки проведено n наклонных линий – трансверселей (обычно $n = 10$ или 5). Длины отрезков, параллельных основанию, на поперечном масштабе равны: между соседними вертикалями – δ , между соседними трансверселями – δ/n . Длины отрезков между вертикалью и исходящей из той же точки трансверсалью изменяются в пределах от 0 до δ/n . Наименьшее деление поперечного масштаба, определяющее его точность, равно $\delta/(mn)$.

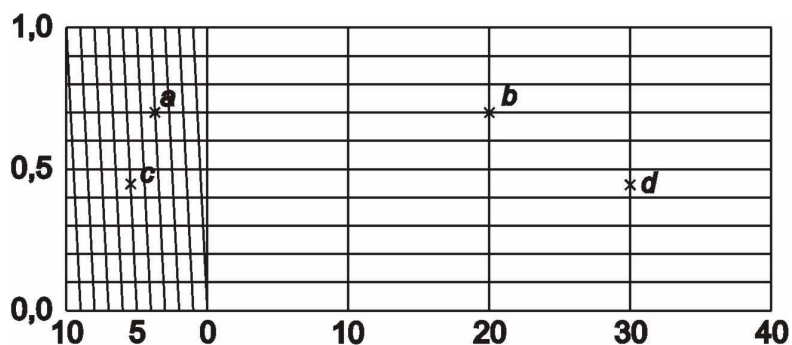


Рис. 4.5. Поперечный масштаб

Для удобства пользования поперечным масштабом деления основания и горизонтали оцифровывают в соответствии с масштабом плана. Оцифровка на рис. 4.5 соответствует масштабу 1:500.

Для измерения расстояния берут его в раствор циркуля-измерителя. Правую его ножку ставят на одну из вертикалей поперечного масштаба, а левую – на одну из трансверселей, но так, чтобы обе ножки оказались на одной и той же горизонтали. Измеренное расстояние равно сумме расстояний, соответствующих числу охваченных раствором циркуля целых оснований, десятых долей основания и сотых, оцениваемых по положению ножки циркуля на трансверсели. Например, на рис. 4.5 отрезок ab имеет длину $20 + 3 + 0,7 = 23,7$ м. Длина отрезка cd равна $30 + 5 + 0,45 = 35,45$ м. Во втором случае видно, что длину отрезка cd измерили с точностью половины наименьшего деления (в данном случае 0,05 м).

Для измерения длин извилистых линий служит специальный прибор – курвиметр, снабженный колесиком, которое прокатывают вдоль измеряемой линии. Вращение передается на стрелку циферблата, по которому считывают измеренное расстояние.

Определение координат точек. Для определения географических координат служит минутная рамка карты. Для нахождения широты через целые значения минут на западной и восточной рамках южнее определяемой точки прочерчивают линию. На рисунке 4.6, a показан отрезок такой линии с широтой $57^{\circ}20'$. Взяв раствором циркуля-измерителя расстояние a от определяемой точки M до прочерченной линии, откладывают его на рамке карты и, по десятисекундным делениям отсчитывают число секунд. На рисунке 4.6, a широта точки M равна $57^{\circ}20'32''$.

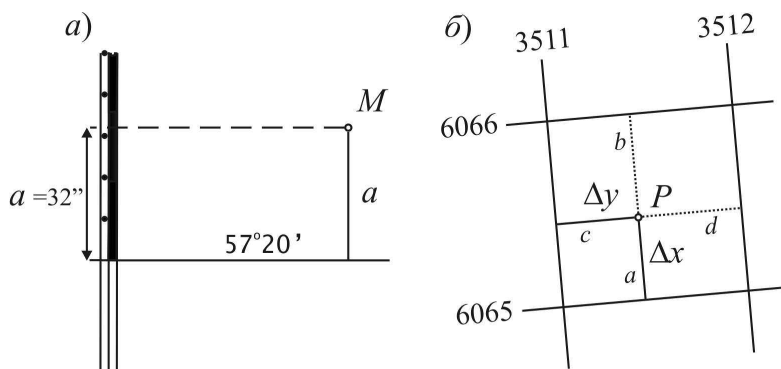


Рис. 4.6. Определение координат точек:
 a – географических; b – прямоугольных

Для определения долготы через одинаковые значения минут на северной и южной рамках прочерчивают вертикальную линию. Расстояние от точки до линии переносят измерителем на северную или южную рамку и отсчитывают число секунд.

Прямоугольные координаты определяют, пользуясь километровой сеткой, линии которой параллельны координатным осям x и y . Координаты точки P (рис. 4.6, б) вычисляют по формулам:

$$x_P = x_{ю} + \Delta x, \quad y_P = y_з + \Delta y,$$

где $x_{ю}$ и $y_з$ – значения координат на линиях сетки, проходящих южнее и западнее точки P . Они подписаны (в километрах) на выходах линий за рамку. Отрезки Δx и Δy находят при помощи поперечного масштаба.

Повысить точность определения координат точки P можно, измерив расстояния a и b до ближайших южной и северной линий сетки и дополнительно расстояния c и d до ближайших западной и восточной линий сетки. Длины отрезков Δx и Δy , выраженные в метрах, вычисляют по формулам:

$$\Delta x = 1000 \frac{a}{a+b}, \quad \Delta y = 1000 \frac{c}{c+d}, \quad (4.1)$$

где множитель 1000 – длина стороны квадрата километровой сетки в метрах.

Дополнительный эффект измерения отрезков a, b, c, d и использования формул (4.1) состоит в ослаблении погрешностей, вызванных деформацией бумаги. Такой же прием может быть применен и при определении географических координат.

Определение углов ориентирования. Дирекционный угол заданной линии на карте измеряют транспортиром как угол, отсчитываемый по часовой стрелке от северного направления вертикальной линии километровой сетки до направления заданной линии. При необходимости перед измерением отрезок удлиняют до пересечения с вертикальной линией километровой сетки.

Для определения азимута A заданной линии сначала измеряют его дирекционный угол α . Затем вычисляют азимут:

$$A = \alpha + \gamma,$$

где γ – сближение меридианов, значение которого подписано под южной рамкой карты и показано на помещенной там же схеме.

Азимут A заданной линии можно измерить и непосредственно. Через одноименные значения минут долготы проводят вертикальную линию – меридиан. Угол между северным направлением меридиана и направлением заданной линии и есть азимут.

Под южной рамкой карты и на схеме указано также склонение магнитной стрелки δ , позволяющее вычислить магнитный азимут направления заданной линии по формуле

$$A_m = A - \delta.$$

Определение высот точек. Высота точки, лежащей на горизонтали, равна высоте горизонтали. Высоты отдельных горизонталей подписаны в их разрыве. Высоты других горизонталей легко определить, зная высоту сечения рельефа, а также высоты подписанных горизонталей и высоты характерных точек рельефа. При этом учитывают, что высоты горизонталей кратны высоте сечения рельефа.

Высота точки M , расположенной между двумя горизонталями (рис. 4.7) определяется по формуле

$$H_M = H_r + h \frac{b}{a},$$

где H_r – высота меньшей из горизонталей, между которыми расположена точка, м; h – высота сечения рельефа, м; отрезки a и b – заложение ската и расстояние от точки до меньшей горизонтали соответственно, измеренные по карте, мм.

Построение профиля. Для построения профиля по линии, проведенной на карте, определяют высоты точек в местах ее пересечения с горизонталями, водораздельными и водосливными линиями. Затем измеряют горизонтальные расстояния от начальной точки линии до точек пересечения. При построении профиля по горизонтальной оси откладывают горизонтальные расстояния, а по вертикальной – значения высот. Для наглядности вертикальный масштаб принимают крупнее горизонтального (в 10, а то и в 50 раз).

Определение уклонов и углов наклона. Отрезки линий на земной поверхности обычно имеют наклон, отчего начало и конец отрезка находятся на разных высотах. Разность их высот называется *превышением*, а проекция отрезка на горизонтальную плоскость – *горизонтальное проложение*.

Уклоном i линии называется отношение превышения h к горизонтальному проложению d :

$$i = h / d. \quad (4.2)$$

Для определения по карте уклона линии на участке KL между двумя горизонталями (рис. 4.7) измеряют его горизонтальное проложение – заложение d . Поскольку концы отрезка лежат на смежных горизонталях, превышение h между ними равно высоте сечения рельефа, подписанной под южной рамкой карты. Воспользовавшись формулой (4.2), вычисляют уклон, который принято выражать в тысячных долях числа. Если, например, $h = 1$ м, $d = 48$ м, то уклон равен $i = 1 \text{ м} / 48 \text{ м} = 0,021 = 21\text{‰}$.

С другой стороны, отношение превышения h к горизонтальному проложению d равно тангенсу угла ν наклона линии. Поэтому

$$i = \text{tg } \nu,$$

что позволяет, вычислив уклон, определить по нему угол наклона.

При пользовании картой углы наклона не вычисляют, а определяют с помощью графика заложений (рис. 4.8), расположенного под южной рамкой карты. По горизонтальной оси графика отложены углы наклона, а по вертикальной – соответствующие этим углам заложения d , выраженные в масштабе карты и рассчитанные по формуле

$$d = h / (M \text{ tg } \nu),$$

где h – высота сечения рельефа; M – знаменатель масштаба карты.

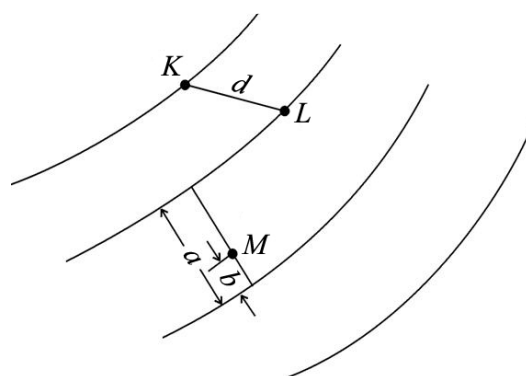


Рис. 4.7. Определение высоты точки M и уклона на отрезке KL

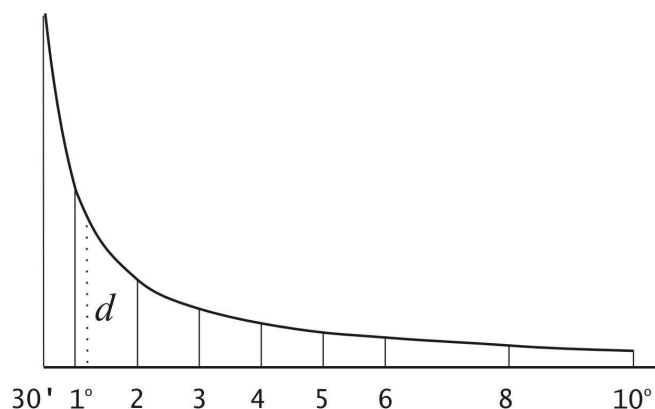


Рис. 4.8. График заложений

Для определения угла наклона отрезка KL (рис. 4.7), расположенного между горизонталями, берут его в раствор циркуля и на графике заложений (рис. 4.8) находят такой угол, над которым ордината равна раствору циркуля d . Это и есть искомый угол наклона.

При необходимости многократного определения уклонов пользуются графиком уклонов, построенным аналогично графику заложений, но с отложением по горизонтальной оси не углов наклона, а уклонов.

Проведение линии с уклоном, не превышающим заданного предельного. Необходимость решения такой задачи возникает, например, при выборе трассы для будущей дороги. Вычисляют соответствующее заданному предельному уклону $i_{пр}$ заложение

$$d = \frac{h}{M \cdot i_{пр}},$$

выраженное в

масштабе карты (здесь M – знаменатель масштаба).

Чтобы уклон линии i не превосходил $i_{пр}$ проектное, ни одно заложение на ней не должно быть меньше, чем рассчитанное d . Если расстояние между горизонталями больше рассчитанного, направление линии можно выбирать произвольно. В противном случае в раствор циркуля берут отрезок, равный d , и строят ломаную линию, уместая между горизонталями рассчитанное предельное заложение (рис. 4.9).

Определение границ водосборной площади (бассейна). Водосборной называют площадь, с которой дождевые и талые воды поступают в данное русло. Определение водосборной площади необходимо, например, при проектировании дороги для расчета отверстия моста или трубы.

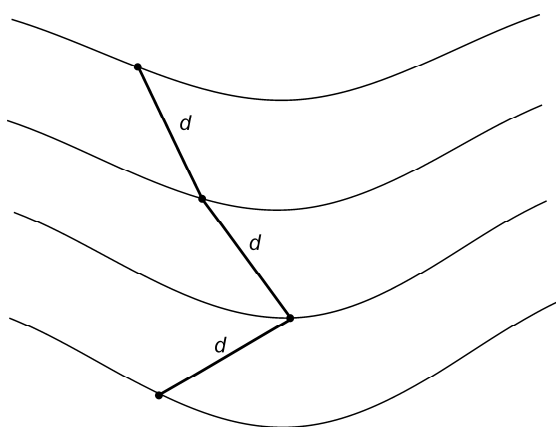


Рис. 4.9. Построение линии с заданным уклоном

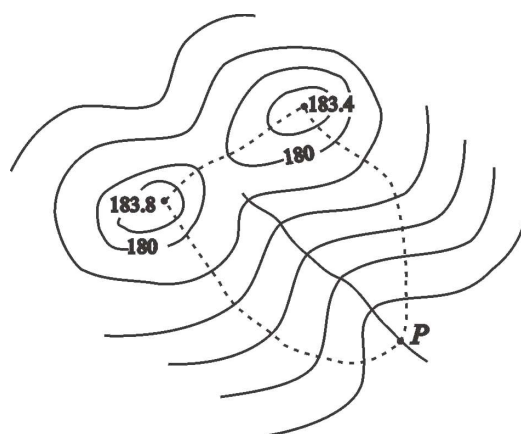


Рис. 4.10. Водосборная площадь

Для определения границ водосборной площади на карте проводят водораздельные линии, а затем от проектируемого сооружения к водораз-

дельным линиям проводят линии наибольшего ската, перпендикулярные горизонталям.

Например, водосборная площадь для точки P , где предстоит строительство трубы, (рис. 4.10), ограничена штриховой линией, образованной водораздельной и двумя линиями наибольшего ската.

4.5. Определение площадей по картам и планам

Аналитический способ. Если участок представляет собой замкнутый многоугольник, то, сняв с плана прямоугольные координаты его вершин, площадь участка вычисляют по формуле

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n} x_i (y_{i+1} - y_{i-1}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n} y_i (x_{i-1} - x_{i+1}),$$

где i – номера вершин многоугольника, пронумерованных по ходу часовой стрелки.

По этой же формуле можно вычислить площадь с криволинейными границами, если координаты точек границы сняты так часто, что отрезки между точками можно считать прямыми. В последнем случае снятие координат выполняют с помощью специального прибора – *дигитайзера*, а вычисления выполняют на ЭВМ.

Графические способы. Участок на плане разбивают на простые геометрические фигуры (обычно – треугольники), элементы которых измеряют с помощью измерителя и поперечного масштаба, а площади вычисляют по известным формулам и суммируют.

Разбиение площади на простые фигуры выполняют также, применяя палетки. *Палетка* – лист прозрачного материала (восковки, лавсана, пластика), на который нанесена сетка квадратов размером 2×2 мм или система равноотстоящих параллельных линий. Наложив палетку с квадратами на план, подсчитывают число квадратов, уместившихся в измеряемой площади, оценивая дробные части квадратов на краях участка на глаз. Результат подсчета умножают на площадь одного квадрата.

Палеткой с параллельными линиями площадь делится на трапеции, в каждой из которых измеряют длину средней линии. Суммируя площади трапеций, равные произведению длины средней линии на расстояние между линиями, определяют площадь участка.

Точность определения площади с помощью палеток – $1/50$.

Полярный планиметр. Планиметрами называются приборы для измерения площадей. Наиболее распространен полярный планиметр (рис. 4.11). Он состоит из двух рычагов – полюсного 1 и обводного 4, соединенных шарниром 8. Полюс планиметра (массивный цилиндр 2 с иглой, втыкаемой в бумагу) в процессе измерения площади остается неподвижным. На конце длинного плеча обводного рычага укреплен шпиль 3 (или лупа с маркой в виде креста в ее центре), которым обводят контур измеряемой площади. На коротком плече обводного рычага крепится каретка с мерным колесиком 6, опирающимся на поверхность бумаги, и счетным механизмом. Когда обводной шпиль 3 (или марка) перемещается по линии контура перпендикулярно рычагу, мерное колесико 6 катится по бумаге. При перемещении обводного шпилья по направлению рычага колесико скользит по бумаге, не вращаясь. При перемещении шпилья в иных направлениях происходит и вращение, и скольжение. Для подсчета числа оборотов вращение колесика передается на циферблат 5. По ободу колесика нанесено 100 делений. Отсчеты по шкале обода берут с помощью верньера 7. Суммарное число оборотов колесика, накопленное при обводке шпильем контура, пропорционально площади, ограниченной контуром.

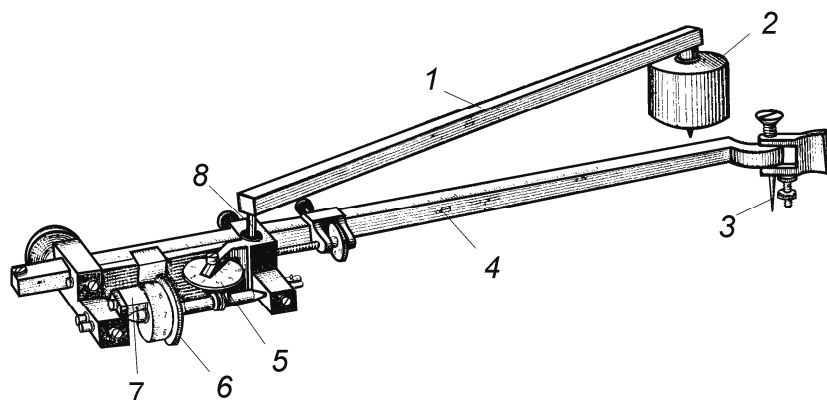


Рис. 4.11. Полярный планиметр

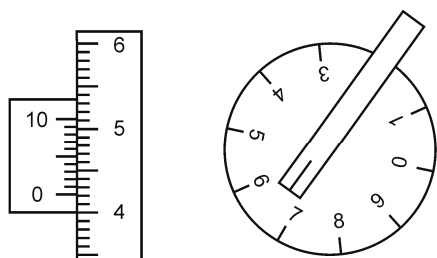


Рис. 4.12. Отсчет по планиметру: 6422

Отсчет по планиметру (рис. 4.12) состоит из отсчета числа целых оборотов колесика по циферблату (на рисунке – цифра 6), отсчета десятых и сотых долей оборота – по шкале обода против нуля верньера (цифры 4 и 2) и тысячных долей оборота – по номеру штриха верньера, совпадающего со штрихом на шкале обода (цифра 2).

Для измерения площади, обводят ее контур, делая при этом два отсчета по планиметру: один n_1 – до обвода, другой n_2 – после. Площадь вычисляют по формуле

$$S = c \cdot (n_2 - n_1), \quad (4.3)$$

где c – цена деления планиметра.

Для надежности площадь измеряют 3 – 5 раз, по полученным результатам вычисляют среднее арифметическое.

Если во время измерений полюс планиметра располагался внутри измеряемой площади, то вместо формулы (4.3) используют формулу

$$S = c \cdot (n_2 - n_1 + Q),$$

где Q – постоянная планиметра.

Цена деления планиметра c зависит от длины обводного рычага и регулируется перемещением по нему каретки с мерным колесиком и счетным механизмом. Перед измерением площади определяют цену деления планиметра. Для этого, расположив полюс в стороне, обводят фигуру, площадь S_0 которой известна (например, квадрат километровой сетки на карте) и вычисляют цену деления:

$$c = S_0 / (n_2 - n_1).$$

Для определения постоянной Q обводят фигуру с известной площадью, поместив полюс внутри этой площади, после чего вычисляют

$$Q = (S_0 / c) - (n_2 - n_1).$$

Точность определения площади планиметром – 1/300.

Электронные планиметры. Электронный полярный планиметр устроен подобно механическому, но имеет электронное счетное устройство и жидкокристаллический дисплей.

Электронный роликовый планиметр катится на двух высокофрикционных абразивных роликах, измеряющих смещения по направлению качения. Поворотная штанга с курсором, перемещаемым по контуру площади, измеряет смещения в поперечном направлении. Счетное устройство вычисляет площадь и высвечивает ее величину на дисплее.

Электронный роликовый планиметр-дигитайзер позволяет, кроме измерения площади, снимать координаты точек и решать некоторые задачи – определение радиуса окружности, длины дуги, площади сегмента и др. Возможна связь с компьютером через стандартный интерфейс.

ТЕМА 5. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Виды измерений и ошибок измерений

Измерение – процесс сравнения некоторой физической величины с другой однородной известной величиной, принятой за единицу измерения.

Результат любого измерения есть число, показывающее во сколько раз измеряемая величина больше или меньше принятой единицы измерения. Если это число обозначить N , измеряемую величину Q и единицу измерения U , то можно написать равенство

$$Q = N \cdot U. \quad (5.1)$$

Измерения в геодезии связаны с использованием различных приборов.

Измерения бывают *прямые* (непосредственные) и *косвенные*. Прямое измерение является простейшим и исторически первым видом измерения, при котором результат получается из непосредственного сравнения с единицей измерения. Косвенные измерения основаны на использовании известных математических зависимостей между искомыми и непосредственно измеренными величинами.

Различают *однократные* и *многократные* измерения. Многократные измерения одного и того же объекта и однократные измерения множества однородных объектов.

Измерения в геодезии рассматриваются с двух точек зрения: *количественной*, выражающей числовое значение измеренной величины, и *качественной*, характеризующей ее точность.

Всякое измерение неизбежно сопровождается ошибками. Под ошибкой измерения подразумевается разность между измеренным значением величины и ее истинным (действительным) значением.

$$\Delta = l - X, \quad (5.2)$$

где X – истинное значение величины, l – измеренное значение величины, Δ – ошибка измерения.

Ошибка имеет величину и знак. Величина ошибки показывает, насколько измеренное значение отклонилось от истинного; знак ошибки показывает, в какую сторону произошло отклонение.

Любая ошибка результата измерения есть следствие действия многих факторов, каждый из которых порождает свою ошибку.

Всякое измерение сопровождается влиянием следующих факторов:

- 1) самого объекта измерения;
- 2) единицы измерения;
- 3) точности технических средств;
- 4) метода измерения;
- 5) условий внешней среды;
- 6) личностных возможностей исполнителя.

Если в процессе измерений сохраняются все перечисленные факторы, т.е. когда измерения, произведены в условиях, позволяющих считать все результаты одинаково надежными, то измерения называют *равноточными*. При неодинаковых условиях – *неравноточными*.

Ошибки, вызванные отдельными факторами, называют *элементарными*. Ошибка результата измерения является алгебраической суммой элементарных ошибок.

Изучением основных свойств и закономерностей действия ошибок измерений, разработкой методов получения наиболее точного значения измеряемой величины и характеристик ее точности занимается *теория ошибок измерений*. Математической основой теории ошибок измерений является теория вероятностей и математическая статистика.

Излагаемые в теории ошибок измерений методы решения задач позволяют *рассчитать* необходимую точность предстоящих измерений и на основании расчета *выбрать* соответствующие приборы и технологию измерений, а после производства измерений *получить* наилучшие их результаты и *оценить* их точность.

Ошибки измерений разделяют по двум признакам: источнику происхождения и характеру их действия.

По **источнику происхождения** различают ошибки приборов внешние и личные. Ошибки приборов обусловлены их конструктивным несовершенством.

Внешние ошибки происходят из-за влияния среды, в которой происходят измерения.

Личные ошибки связаны с психофизическими индивидуальными особенностями наблюдателя.

По **характеру действия** ошибки подразделяют на грубые, систематические и случайные.

Грубые ошибки являются результатом промахов, просчетов, превышающим по абсолютной величине некий, установленный предел. Обнаруживают эти ошибки повторными наблюдениями, а результаты бракуют и заменяют новыми. В теории ошибок грубые ошибки не изучаются.

Систематические ошибки имеют определенный источник, направление и величину. К источникам появления этих ошибок относят:

- несовершенство метода измерения;
- неточную градуировку и неправильную установку измерительной аппаратуры.

Важно обнаружить и изучить источник систематической ошибки, а затем устранить или ослабить его влияние. Задача решается путем тщательной проверки измерительных приборов, введения поправок в результаты измерений, применения соответствующих методик измерений. Пока источник какой-либо систематической ошибки не найден, ее считают случайной, ухудшающей качество измерений.

Случайные ошибки – это ошибки, размер и влияние которых на каждый отдельный результат измерения остается неизвестным. **Случайные ошибки неустранимы**, но они подчинены определенным вероятностным закономерностям, изучение которых дает возможность получить наиболее надежный результат и оценить его точность. Закономерности случайных ошибок проявляются в массе, т. е. при большом количестве измерений. Такие измерения называют статистическими. Освободить результат единичного измерения от случайных ошибок невозможно, невозможно также предсказать случайную ошибку единичного измерения. Теория ошибок занимается в основном изучением случайных ошибок.

5.1.1. Свойства случайных ошибок

Если не допускать грубых ошибок и исключить систематические ошибки, то качество результатов измерений будет определяться только случайными ошибками, которые характеризуются следующими свойствами:

1. *Свойство ограниченности* – случайные ошибки по абсолютной величине не превышают некоторой величины

$$|\Delta| \leq \Delta^{\text{пред}}, \quad (5.3)$$

называемой *предельной ошибкой*. Это свойство позволяет обнаруживать и исключать грубые ошибки.

2. *Свойство симметричности относительно нуля*: положительные и отрицательные ошибки, равные по абсолютной величине, примерно одинаково часто встречаются в ряду измерений, что помогает выявлению систематических ошибок:

$$p(\Delta > 0) = p(\Delta < 0) = 0,5, \quad (5.4)$$

где p – вероятность события.

3. *Свойство компенсации*: сумма случайных ошибок, деленная на их число при неограниченном увеличении количества измерений n , стремится к нулю:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots + \Delta_n}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{[\Delta_i]}{n} = 0, \quad (5.5)$$

где квадратные скобки – знак суммы (по Гауссу).

4. *Свойство плотности*: чем больше по абсолютной величине случайная ошибка, тем реже она встречается и, наоборот, чем меньше случайная ошибка, тем чаще она появляется в ряду измерений.

Кроме того, во всей массе случайных ошибок не должно быть явных зависимостей ни по знаку, ни по величине. Если закономерность обнаруживается, то здесь сказывается влияние какой-то систематической ошибки.

5.2. Оценка точности равноточных измерений

Под *точностью* измерений понимают качество измерений, определяющее близость их результатов к точному значению измеряемой физической величины.

Свойство компенсации случайных ошибок позволяет установить принцип получения из ряда измерений одной и той же величины результата, наиболее близкого к ее истинному значению, т. е. наиболее точного. Таким результатом является среднее арифметическое из n измеренных значений данной величины. При неограниченно большом числе измерений n и отсутствии систематической ошибки арифметическое среднее стремится к истинному значению

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{[l]}{n} = X. \quad (5.6)$$

При конечном числе измерений арифметическая средина

$$x = \frac{[l]}{n}. \quad (5.7)$$

содержит остаточную случайную ошибку, однако от точного значения X измеряемой величины она отличается меньше, чем любой результат l непосредственного измерения. Это позволяет при любом числе измерений $n > 1$ принимать арифметическую средину за вероятнейшее (окончательное) значение измеренной величины. Точность окончательного результата тем выше, чем больше n . *Значение арифметической средины является наиболее точным и надежным значением измеряемой величины.*

5.2.1. Средняя квадратическая ошибка

Чтобы выполнить оценку точности измерений, необходимо оценить, прежде всего, точность отдельного измерения. Было бы естественным взять для этого среднее арифметическое из всех случайных ошибок. Однако в этом случае на величину средней ошибки оказывают влияние знаки отдельных ошибок, и в ряду с большими по абсолютной величине отдельными ошибками среднее арифметическое может получиться меньше, чем в ряду, который таких ошибок не содержит.

Если взять среднее арифметическое из абсолютных значений случайных ошибок, то недостаточно будет отражено наличие в данном ряду отдельных больших по абсолютной величине ошибок.

При выборе критерия для оценки точности ряда измерений необходимо иметь в виду, что результат должен быть получен с одинаковой точностью, независимо от того будет он больше или меньше истинного значения измеряемой величины.

Этим условиям лучше всего удовлетворяет *средняя квадратическая ошибка* (СКО) результата измерения, выражаемая соотношением известным как *формула К. Гаусса*

$$m = \pm \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{n}} = \pm \sqrt{\frac{[\Delta_i \Delta_i]}{n}} = \pm \sqrt{\frac{[\Delta_i^2]}{n}}, \quad (5.8)$$

где Δ_i – разности измеренных величин l_i и их истинных значений X ,

$$\Delta_i = l_i - X. \quad (5.9)$$

Вычисление СКО измерений по формуле Гаусса возможно только тогда, когда известно истинное значение измеряемой величины. При выполнении измерений истинное значение измеряемой величины, как правило, неизвестно. В тоже время по результатам многократных измерений можно получить результат наиболее близкий к истинному значению – арифметическую средину. В этом случае СКО отдельного измерения вычисляют по отклонениям отдельных значений v измеренной величины l_i от их арифметической середины x . Отклонения называют *вероятнейшими* ошибками

$$v_i = x - l_i,$$

причем $[v] = 0$.

Формулу для оценки результатов измерений по вероятнейшим ошибкам вывел немецкий астроном *Ф. Бессель*

$$m = \sqrt{\frac{[v_i v_i]}{n-1}} = \sqrt{\frac{[v_i^2]}{n-1}}. \quad (5.10)$$

Точность арифметической середины, естественно, будет выше точности отдельного измерения. Ее средняя квадратическая ошибка M определяется по формуле

$$M = \frac{m}{\sqrt{n}}, \quad (5.11)$$

или

$$M = \sqrt{\frac{[v_i^2]}{n \cdot (n-1)}} \quad (5.12)$$

5.2.2. Средняя квадратическая ошибка функции измеренных величин

В тех случаях, когда пользуются косвенными методами измерений, т. е. определяемая величина является функцией других непосредственно измеренных величин, ошибка результата зависит как от ошибок измеренных величин, так и от действий, с помощью которых вычислен искомый результат, поэтому возникает задача о вычислении средней квадратической ошибки функции измеренных величин.

Рассмотрим нескольких элементов произвольного вида:

$$F = f(X, Y, Z, \dots), \quad (5.13)$$

где F – истинное значение функции; X, Y, Z, \dots – истинные значения аргументов.

В результате измерений получены измеренные значения аргументов l_X, l_Y, l_Z, \dots при этом

$$\begin{aligned} X &= l_X + \Delta_X, \\ Y &= l_Y + \Delta_Y, \\ Z &= l_Z + \Delta_Z, \end{aligned} \quad (5.14)$$

где $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ – случайные истинные ошибки измерения аргументов.

Функцию F можно выразить через измеренные значения аргументов и их истинные ошибки:

$$F = f(l_X + \Delta_X, l_Y + \Delta_Y, l_Z + \Delta_Z, \dots). \quad (5.15)$$

Допуская, что ошибки аргументов малы по сравнению с их величинами, предыдущее выражение можно представить в виде ряда Тейлора, ограничившись первой степенью малых приращений $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$:

$$F = f(l_X, l_Y, l_Z, \dots) + \frac{\partial f}{\partial X} \Delta_X + \frac{\partial f}{\partial Y} \Delta_Y + \frac{\partial f}{\partial Z} \Delta_Z + \dots \quad (5.16)$$

Разность $F - f(l_X, l_Y, l_Z, \dots)$ является случайной истинной ошибкой функции, поэтому

$$\Delta F = \frac{\partial f}{\partial X} \Delta_X + \frac{\partial f}{\partial Y} \Delta_Y + \frac{\partial f}{\partial Z} \Delta_Z + \dots \quad (5.17)$$

Если выполнить n измерений аргументов X, Y, Z, \dots , то можно записать n уравнений вида (5.15). Возведем все эти уравнения в квадрат и сложим их. Суммарное уравнение разделим на n . Учитывая, что члены, содержащие произведения случайных ошибок, незначительны по величине (свойство компенсации случайных ошибок) и ими можно пренебречь, получим

$$\frac{[\Delta F^2]}{n} = \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 \cdot \frac{[\Delta_X^2]}{n} + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^2 \cdot \frac{[\Delta_Y^2]}{n} + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^2 \cdot \frac{[\Delta_Z^2]}{n} + \dots$$

или, переходя к СКО,

$$m_F^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^2 \cdot m_X^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^2 \cdot m_Y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^2 \cdot m_Z^2 + \dots \quad (5.18)$$

Как частные случаи формулы (5.16) можно записать выражения для средней квадратической ошибки некоторых функций:

$$\begin{aligned} F &= k \cdot X; & m_F^2 &= k^2 \cdot m_X^2; \\ F &= a \cdot X \pm b \cdot Y; & m_F^2 &= a^2 \cdot m_X^2 + b^2 \cdot m_Y^2; \\ F &= X \cdot \operatorname{tg}(Y); & m_F^2 &= \operatorname{tg}^2(Y) \cdot m_X^2 + \frac{X^2}{\cos^4(Y)} \cdot m_Y^2. \end{aligned} \quad (5.19)$$

5.3. Оценка точности по разностям двойных измерений

При исследовании приборов, определении точности способов измерений и выполнении топографо-геодезических работ одну и ту же величину часто измеряют дважды. Например, длины сторон теодолитного хода измеряют прямо и обратно, горизонтальные углы – двумя полуприемами и т. д. В этом случае оценку точности результатов измерений выполняют по разностям двойных измерений.

Если бы все измерения были без ошибок, то разности были бы равны нулю. Следовательно, разности двойных измерений можно рассматривать как случайные ошибки. Оценить *точность определения одной разности из всей совокупности измерений*, т. е. вычислить ее среднюю квадратическую ошибку m_{d_i} можно из соотношения, близкого по своему смыслу к формуле Гаусса

$$m_{d_i} = \pm \sqrt{\frac{[d_i d_i]}{n}} = \pm \sqrt{\frac{[d_i^2]}{n}}, \quad (5.20)$$

где d_i – разности двойных измерений l_1, l_2 ; n – количество двойных разностей.

Каждая разность образована как $d_i = l_1 - l_2$. Поэтому средняя квадратическая ошибка одной разности d выражается формулой

$$m_d^2 = m_{l_1}^2 + m_{l_2}^2.$$

Так как измерения l равноточны, то $m_{l_1} = m_{l_2}$. Следовательно,

$$m_d^2 = 2 m_l^2.$$

Отсюда

$$m_d = m_l \sqrt{2},$$

$$m_l = \frac{m_d}{\sqrt{2}}. \quad (5.21)$$

Средняя квадратическая ошибка m_l отдельного измерения l_i по разностям двойных измерений определяется по формуле

$$m_{l_i} = \pm \sqrt{\frac{[d^2]}{2n}}. \quad (5.22)$$

Из разности двойных измерений l_1 и l_2 обычно берут среднее значение:

$$l_{cp} = \frac{l_1 + l_2}{2}, \quad (5.23)$$

тогда согласно формуле (5.19)

$$m_{l_i} = \frac{m_l}{\sqrt{2}}. \quad (5.24)$$

Для оценки точности среднего арифметического из всей совокупности измерений по разностям двойных измерений используют формулу

$$M = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[d^2]}{n}}. \quad (5.25)$$

5.4. Предельная и относительная ошибки

В соответствии с первым свойством случайных ошибок для абсолютной величины случайной ошибки при данных условиях измерений существует допустимый предел, называемый *предельной ошибкой*.

Теорией ошибок измерений доказано, что абсолютное большинство случайных ошибок (63,8%) данного ряда измерений находится в интервале от 0 до $\pm m$; в интервал от 0 до $\pm 2m$ попадает (95,4%), а от 0 до $3m$ – 99,7% ошибок.

Таким образом, из 100 ошибок данного ряда измерений лишь пять могут оказаться больше или равны $2m$, а из 1000 ошибок только три будут больше или равны $3m$.

На основании этого для заданного ряда измерений, чтобы определить допустимость полученных ошибок, в соответствии с предъявляемыми требованиями, вычисляют предельную ошибку:

- $\Delta_{пред.} = m$ с вероятностью 0,683;
- $\Delta_{пред.} = 2m$ с вероятностью 0,954;
- $\Delta_{пред.} = 3m$ с вероятностью 0,997.

Ошибки, по абсолютному значению превышающие значение принятой предельной ошибки $\Delta_{пред.}$, относят к грубым.

В строительных нормах предельную ошибку называют *допускаемым отклонением или стандартом*.

Стандарт – критерий оценки точности результатов измерений. Стандарт определяет своей величиной степень разброса (рассеивания) случайных погрешностей относительно нуля. Величина предельной ошибки прямо пропорциональна стандарту.

О точности геодезических измерений можно судить не только по абсолютной величине средней квадратической или предельной ошибки, но и по величине относительной ошибки.

Относительной ошибкой называется отношение соответствующей абсолютной ошибки к значению измеренной величины. Относительная ошибка выражается в виде простой дроби, числитель которой равен единице, а знаменатель – это число, округленное до двух-трех значащих цифр с нулями.

5.5. Оценка точности ряда равноточных измерений

Точность результатов многократных измерений одной и той же величины оценивают в такой последовательности.

1. Находят вероятнейшее (наиболее точное для данных условий) значение измеренной величины по формуле арифметической середины.
2. Вычисляют отклонение значения арифметической середины от каждого значения измеренной величины. Контроль вычислений: $[v] = 0$.
3. По формуле Бесселя вычисляют среднюю квадратическую ошибку одного измерения.
4. Вычисляют среднюю квадратическую ошибку арифметической середины.
5. Если измерены линейные величины, то подсчитывают относительную среднюю квадратическую ошибку измерений.
6. При необходимости подсчитывают предельную ошибку одного измерения, которая может служить допустимым значением ошибок аналогичных измерений.

5.6. Оценка точности неравноточных измерений

5.6.1. Понятие неравноточных измерений

Измерения, выполненные в различных условиях, различными приборами, различным числом приемов, называют *неравноточными*.

Достоинство результата измерения выражают в этом случае числом, называемым *весом* измерения. Чем надежнее результат измерения, тем больше его вес.

Вес устанавливается в зависимости от условий измерений. Так как определенным условиям измерений соответствует определенная СКО, то наиболее достоверно устанавливать веса измерений в зависимости от нее.

Весом p отдельного результата измерения называют отвлеченное число c , обратно пропорциональное квадрату СКО m^2 , т. е.

$$p = \frac{c}{m^2}. \quad (5.26)$$

Вес арифметической середины P может быть представлен аналогичным соотношением

$$P = \frac{c}{M^2}. \quad (5.27)$$

Определим отношение веса арифметической середины P к весу отдельного измерения p

$$\frac{m}{p} = \frac{c}{M^2} : \frac{c}{m^2} = \frac{cn}{m^2} : \frac{c}{m^2} = n. \quad (5.28)$$

Таким образом, вес арифметической середины в n раз больше веса отдельного измерения.

Так как вес отдельного измерения $p = 1$, то вес арифметической середины $P = n$. Следовательно, вес арифметической середины равен числу измерений, из которых она составлена.

5.6.2. Оценка точности отдельного измерения и среднего арифметического

Оценка точности результатов неравноточных измерений заключается в определении вероятнейшего значения весового арифметического среднего x_0 , СКО отдельного результата измерения μ , вес которого равен единице, и средней квадратической ошибки M_0 арифметической середины.

При этом значение арифметической середины рассчитывается из соотношения

$$x_0 = \frac{l_1 p_1 + l_2 p_2 + l_3 p_3 + \dots + l_n p_n}{p_1 + p_2 + p_3} = \frac{[lp]}{[p]}. \quad (5.29)$$

*Среднюю квадратическую ошибку отдельного результата измерения, вес которого равен единице, называют **средней квадратической ошибкой единицы веса**.*

Пусть известны истинные случайные ошибки измерений $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$, тогда СКО единицы веса определяют по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{[p\Delta^2]}{n}}. \quad (5.30)$$

Если истинные ошибки неизвестны, то оценку точности выполняют по вероятнейшим уклонениям, используя выражение

$$\mu = \sqrt{\frac{pv^2}{n-1}}. \quad (5.31)$$

Среднюю квадратическую ошибку арифметической середины M_0 вычисляют по формуле

$$M_0 = \frac{\mu}{\sqrt{[P]}}. \quad (5.32)$$

Для определения весов измерений используют формулу

$$P_i = \frac{\mu^2}{m_i^2}, \quad (5.33)$$

где μ – безразмерный коэффициент.

Понятие веса применимо и для любой функции F измеренных величин. Если известна СКО функции, то ее вес вычисляют по формуле

$$P_F = \frac{\mu^2}{m_F^2}. \quad (5.34)$$

Из предыдущей формулы получим

$$m_F = \frac{\mu}{\sqrt{P_F}}. \quad (5.35)$$

В практике проектирования геодезических измерений и их обработки решают две основные задачи:

- установление весов неравноточных или разнородных измерений с целью совместной обработки их результатов;
- определение веса функции неравноточных измерений аргументов для получения средней квадратической ошибки функции и наоборот.

5.7. Основные правила вычислений

Источником для производства вычислений являются результаты полевых измерений определенного вида геодезических работ. При геодезических измерениях и вычислениях, как правило, оперируют с приближенными числами. Следовательно, задачей геодезических вычислений должно быть стремление уменьшить насколько это возможно вероятность по-

грешностей и получить результат наиболее простым способом. Общим правилом при вычислениях с приближенными числами является то, что в конечном результате сохраняют столько значащих цифр, сколько их было в числе с наименьшим количеством значащих цифр. При этом в приближенном числе принято выделять десятичные знаки, значащие цифры и верные цифры. *Десятичными знаками* считаются все цифры, стоящие после запятой, *значащими цифрами* – все цифры числа, кроме нулей слева и нулей справа, за исключением случаев, когда нули справа получены в результате округления или заменяют известные цифры. Например, числа 7025 и 20,04 имеют по 4 знака, и все они являются значащими цифрами; 640 и 100 имеют по 3 знака и 3 значащих цифры; 181,96 при округлении до десятых долей сохранит 4 значащих цифры 182,0.

Верными называются цифры числа, «заслуживающие доверия». Так, например, при измерении длин линий с точностью до 0,1 м получены значения длины 123,375 м и 123,365 м, следовательно, верным будет число 123,4 м.

В тех случаях, когда приближенные числа содержат излишнее количество неверных значащих цифр, прибегают к округлениям. Окончательный результат может содержать не более одной лишней значащей цифры. Числа округляют по общим правилам: если следующая после оставляемой цифры меньше 5, ее и последующие цифры отбрасывают; если больше 5 – к последней оставляемой цифре прибавляют единицу; если равно 5 – предыдущую четную оставляют неизменной, а нечетную округляют до четной. В приведенном примере верно будет 123,38 и 123,36 м, в окончательном виде – 123,37 м.

При работе с приближенными числами следует руководствоваться следующими правилами:

- в арифметических действиях в сумме или разности оставляют столько десятичных знаков, сколько их имеет число с наименьшим количеством десятичных знаков;
- в произведении или частном сохраняют столько значащих цифр, сколько их было в числе с наименьшим количеством значащих цифр;
- при возведении числа в степень или при извлечении корня сохраняют столько значащих цифр, сколько их было в исходном числе.

Эти правила следует соблюдать и при использовании таблиц натуральных значений тригонометрических функций, а также других таблиц.

В геодезических измерениях, производимых в больших объемах, в геодезических сетях различных классов, видов и назначений или локальных сетях, где для уравнивания используются ЭВМ, разрабатываются специальные программы и составляются алгоритмы, перечисленные выше правила и принципы устраняются автоматически.

ТЕМА 6. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ

Геодезической сетью называют совокупность пунктов на земной поверхности, закрепленных специальными центрами, положение которых определено в общей для них системе координат и высот.

Различают плановые, высотные и пространственные сети. *Плановые сети* – это сети, в которых определены плановые координаты (прямоугольные – x , y или геодезические – широта B и долгота L) пунктов. В *высотных сетях* определяют высоты пунктов относительно начальной уровенной поверхности. В *пространственных сетях* определяют пространственные координаты пунктов, например, прямоугольные геоцентрические X , Y , Z или геодезические B , L , H .

По территориальному охвату и назначению геодезические сети подразделяют:

- на глобальные, покрывающие поверхность всей Земли;
- национальные (государственные), создаваемые на территории данной страны;
- сети сгущения, геодезическое съемочное обоснование (для топографических съемок);
- специальные (местные) геодезические сети.

Развитие геодезических сетей осуществляется по принципу «от общего к частному», т. е. от более крупных по размерам построений к менее крупным, и от более точных к менее точным.

Глобальная геодезическая сеть создается методами космической геодезии по материалам наблюдений искусственных спутников Земли (ИСЗ). Положение пунктов определяется в геоцентрической системе прямоугольных координат с началом в центре масс Земли, ось Z совпадает с осью вращения Земли, плоскость XZ – с плоскостью начального меридиана, ось OY дополняет систему до правой. Глобальную геодезическую сеть используют для решения научных и научно-технических задач геодезии, геофизики, астрономии и других наук, например, для уточнения фундаментальных геодезических постоянных, изучения фигуры и гравитационного поля Земли, определения перемещения и деформации литосферных плит земной коры и т. п. Глобальная геодезическая сеть должна непрерывно совершенствоваться путем повышения точности определения координат ее пунктов, что необходимо для более эффективного решения традиционных и новых научных проблем геодезии и других наук.

Национальная геодезическая сеть подразделяется на *государственную плановую и государственную высотную (нивелирную) сеть*. Государственная геодезическая сеть (ГГС) состоит из пунктов, взаимное плановое положение которых определяют с наивысшей точностью, достигнутой в массовых измерениях, высоты пунктов этой сети, особенно в горах, определяют с меньшей точностью.

Государственная нивелирная сеть содержит пункты, высоты которых относительно поверхности квазигеоида определяют с наивысшей точностью, плановое положение этих пунктов определяют приближенно.

Государственные геодезические сети необходимы для распространения единой системы координат и высот на территории страны, детального изучения фигуры и гравитационного поля, выполнения топографических съемок в единой системе координат и высот, надежного контроля качества топографо-геодезических работ, решения научных и технических задач народного хозяйства.

Специальные (местные) геодезические сети создают в тех случаях, когда для решения поставленных задач на данном участке нужно иметь пункты, взаимное расположение которых в плане и по высоте определено с наивысшей точностью. Систему координат в таких сетях обычно подбирают так, чтобы редуцированные поправки за переход от измеренных величин к их проекциям на местную поверхность относимости были минимальными. Такие сети строят, например, в сейсмоактивных регионах для прогнозирования землетрясений, при строительстве крупных сооружений и т. п.

Пункты ГГС определены на всей территории страны в единой системе координат. В этом случае результаты съемочных работ будут получены также в единой системе, независимо от последовательности их выполнения в отдельных районах страны, что обеспечивает соединение разрозненных съемочных материалов в единую топографическую карту государства.

В отдельных случаях допускается использование автономной системы координат при работах на незначительных территориях.

6.1. Методы построения плановых сетей

При построении плановых сетей отдельные пункты сети служат исходными – их координаты должны быть известны. Координаты остальных пунктов определяют с помощью измерений, связывающих их с исходными. Плановые геодезические сети создают следующими методами.

Триангуляция – метод определения планового положения геодезических пунктов путем построения на местности сети треугольников, в которых измеряют углы, а также длины некоторых сторон, называемых базисными сторонами (рис. 6.1).

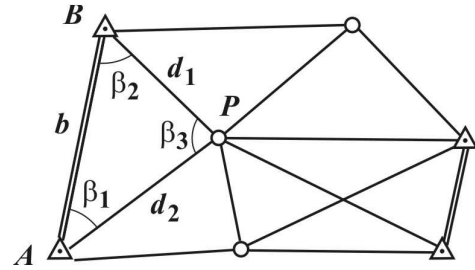


Рис. 6.1. Схема сети триангуляции

Положим, что в треугольнике ABP известны координаты пунктов $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$. Это позволяет путем решения обратной геодезической задачи определить длину стороны $AB = b$ и дирекционный угол α_{AB} направления с пункта A на пункт B . Длины двух других сторон треугольника ABP могут быть вычислены по теореме синусов

$$d_1 = b \cdot \sin\beta_1 / \sin\beta_3; \quad d_2 = b \cdot \sin\beta_2 / \sin\beta_3.$$

Продолжая подобным образом, вычисляют длины всех сторон сети. Если, кроме базиса b известны другие базисы (на рис. 6.1 базисы показаны двойной линией), то длины сторон сети можно вычислить с контролем.

Дирекционные углы сторон AP и BP треугольника ABP равны

$$\alpha_{AP} = \alpha_{AB} + \beta_1; \quad \alpha_{BP} = \alpha_{AB} \pm 180^\circ - \beta_2.$$

Координаты пункта P определяются по формулам прямой геодезической задачи:

$$x_P = x_A + d_2 \cos \alpha_{AP}; \quad y_P = y_A + d_2 \sin \alpha_{AP}.$$

Аналогично вычисляют координаты всех остальных пунктов.

Трилатерация – метод определения планового положения геодезических пунктов путем построения на местности сети треугольников, в которых измеряют длины их сторон.

Если в треугольнике ABP (рис. 6.1) известен базис b и измерены стороны $BP = d_1$ и $AP = d_2$, то на основе теоремы косинусов, можно вычислить углы треугольника:

$$\begin{aligned} \cos\beta_1 &= (b^2 + d_2^2 - d_1^2) / 2bd_2; \\ \cos\beta_2 &= (b^2 + d_1^2 - d_2^2) / 2bd_1; \\ \cos\beta_3 &= (d_1^2 + d_2^2 - b^2) / 2d_1d_2. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Так же вычисляют углы всех треугольников, а затем, как и в триангуляции, – координаты всех пунктов.

Линейно-угловая сеть строится, как правило, как сеть треугольников, в которых измеряют углы и длины сторон. Такие сети имеют большое число избыточных измерений и поэтому отличаются высокой надежностью.

Полигонометрия – метод определения планового положения геодезических пунктов путем проложения ломаной линии (полигонометрического хода) или системы связанных между собой ломаных линий (сети полигонометрии), в которых измеряют углы поворота и длины сторон.

Схема полигонометрического хода показана на рис. 6.2, *a*, где *A* и *B* – исходные пункты; *CA* и *BD* – исходные направления, дирекционные углы которых известны; 1, 2, 3, 4, 5 – точки (вершины) хода; β_i – измеренные горизонтальные углы; d_i – измеренные длины сторон ($i = 1, 2, \dots$).

На рис. 6.2, *б* показана схема системы полигонометрических ходов. Точки 2, 4, 8, где соединяются разные ходы, называются узловыми.

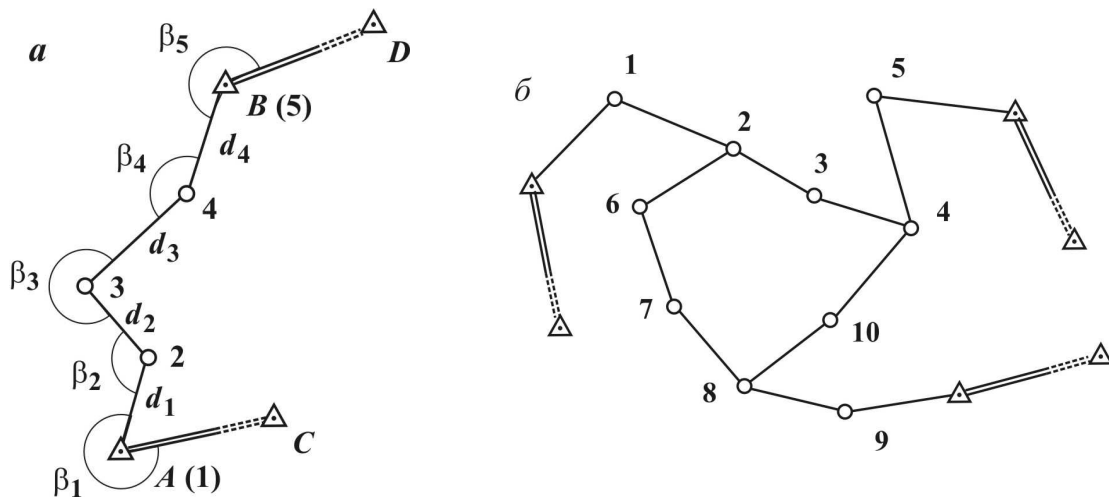


Рис. 6.2. Полигонометрия:

a – полигонометрический ход; *б* – система ходов

Комбинированные геодезические сети создают на местности с сильно различающимися условиями, когда по технико-экономическим показателям целесообразно на одном участке создавать, например, триангуляцию, а на соседних – полигонометрию или трилатерацию.

Спутниковый метод определения координат геодезических пунктов основан на измерениях по сигналам спутников навигационных систем ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США), выполняемых двумя (и более) наземными приемниками. По результатам измерений с высокой точностью определяют разности ΔX , ΔY , ΔZ геоцентрических координат между пункта-

ми. Если координаты одного из пунктов известны, то, прибавив к ним измеренные разности, находят координаты остальных пунктов. Затем координаты преобразуют в геодезические или плоские прямоугольные.

6.2. Развитие государственной геодезической сети

Государственной геодезической сетью называют сеть закрепленных точек земной поверхности, обеспечивающую распространение координат на территорию государства и являющуюся исходной для создания других геодезических сетей.

В конце 20-х гг. прошлого века Ф.Н. Красовский разработал фундаментальную программу построения государственной триангуляции в СССР. В 1939 г. она нашла отражение в Основных положениях о построении опорной геодезической сети СССР. Согласно этой программе государственная триангуляция создавалась по принципу перехода от общего к частному (рис. 6.3), состояла из рядов триангуляции (астрономо-геодезической сети) I класса длиной 200 – 250 км, прокладываемых примерно вдоль параллелей и меридианов; основных рядов триангуляции 2 класса длиной 100 – 120 км; заполняющей сети 2 класса, сети 3 класса и определяемых засечками пунктов 4 класса [11].

На пересечениях рядов 1 класса определяли длину и азимут выходных сторон триангуляции. Длины выходных сторон находили путем построения базисных сетей, в которых измеряли все углы и базис длиной 6 – 8 км; углы против базиса должны быть не менее 36". Базисы измеряли с относительной СКО не более 1:500000, а длины сторон определяли с ошибкой не более 1:300000.

На концах выходных сторон – пунктах Лапласа – определяли астрономические широты φ , долготы λ и азимуты α . В каждом звене триангуляции 1 класса (*звеном* называют часть триангуляции 1 класса между соседними выходными сторонами), кроме пунктов Лапласа, через 70 – 100 км устанавливали промежуточные астрономические пункты, на которых измеряли φ и λ .

Каждый полигон 1 класса делился на четыре части основными рядами 2 класса (см. рис. 6.3), в пересечении рядов строилась базисная 3 сеть для определения выходной стороны, на концах которой размещали пункты Лапласа для определения φ , λ и α .

Топографические съемки в масштабах 1:5000 и 1: 2000 для удовлетворения потребностей различных отраслей народного хозяйства СССР привели в конце 40-х гг. к необходимости увеличить плотность и точность государственных геодезических сетей. Проект новой программы был опубликован для обсуждения в 1948 г.; в 1954 – были утверждены «Основные положения о государственной геодезической сети СССР», в которые в 1961 г. были внесены изменения и дополнения в связи с применением высокоточных свето- и радиодальномеров. На основе положения 1954 – 1961 гг. в 1966 г. была издана Инструкция о построении государственной геодезической сети СССР.

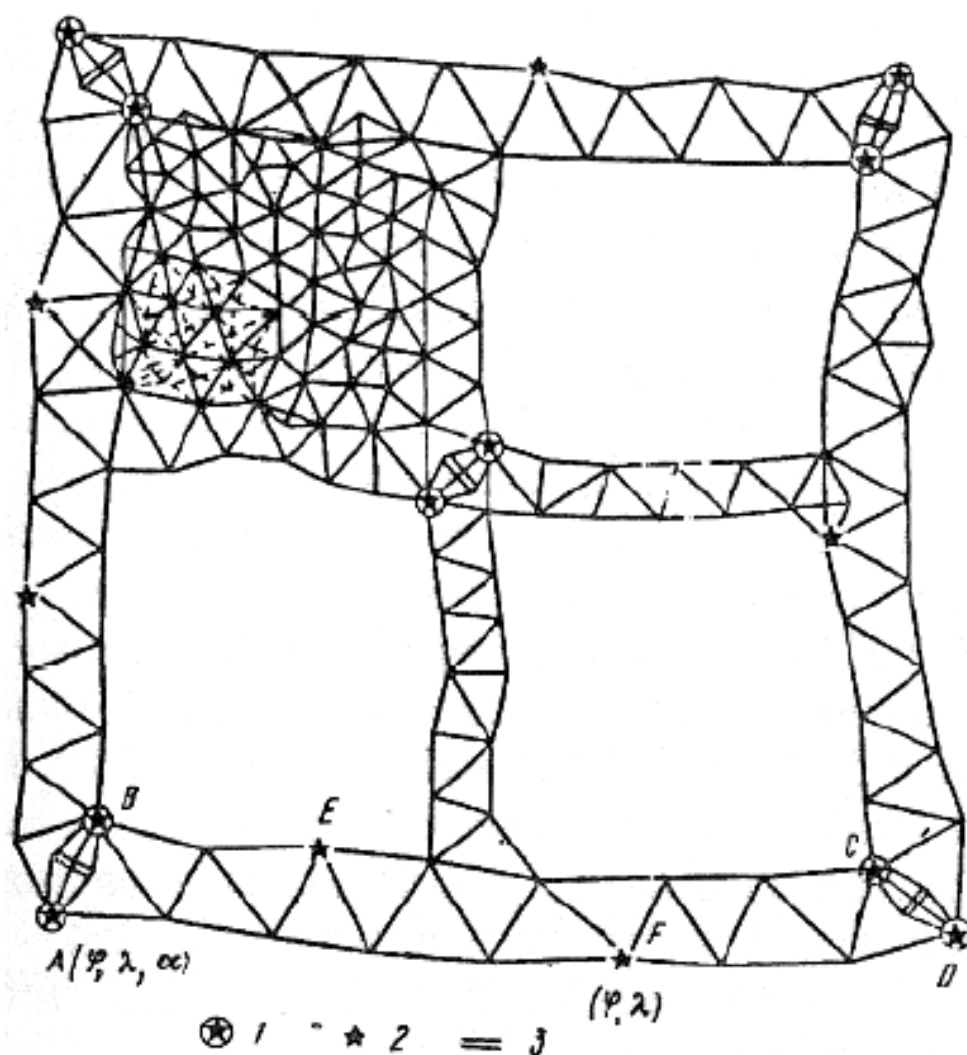


Рис. 6.3. Схема Красовского государственной триангуляции:
 1 – пункт Лапласа; 2 – промежуточный астропункт; 3 – базис

Общим в новой и старой программах является соблюдение принципа перехода от общего к частному. Государственная геодезическая сеть явля-

ется главной геодезической основой топографических съемок всех масштабов и должна удовлетворять требованиям народного хозяйства и обороны страны при решении соответствующих научных и инженерно-технических задач. ГГС создается методами триангуляции, полигонометрии, трилатерации и их сочетаниями, позволяющими при прочих равных условиях обеспечивать требуемую точность и наибольшую экономическую эффективность.

Государственную геодезическую сеть подразделяют на сети 1, 2, 3, и 4 классов. Астрономо-геодезическая сеть (АГС) 1 класса создается полигонами длиной около 800 км, длина звена 200 км, используется для научных исследований по изучению формы и размеров Земли, ее внешнего гравитационного поля и для распространения единой системы координат на всю территорию страны. Геодезические сети 2 класса являются основой для создания сетей 3 и 4 классов.

Астрономо-геодезическая сеть. Типовой фигурой звеньев триангуляции 1 класса является треугольник, близкий равностороннему, могут также использоваться комбинации треугольников, геодезических четырехугольников и центральных систем. В отдельных районах, где это целесообразно, могут строиться сплошные сети триангуляции 1 класса и звенья полигонометрии 1 класса, которые должны быть вытянутыми (максимальное удаление пунктов от замыкающей – не более 20 км, углы между отдельными сторонами и замыкающей – не более 20°), содержать не более 10 сторон длиной 20 – 25 км и иметь через 10 сторон базисные стороны и пункты Лапласа.

На пересечении рядов светодальномерами измеряют базисные стороны с относительной ошибкой не более 1:400000. Оба конца базисных сторон являются пунктами Лапласа, на которых определяют φ , λ и α . Используя уравнение Лапласа, определяют геодезические азимуты A , которые позволяют ориентировать АГС, контролировать результаты геодезических измерений путем определения свободного члена азимутального условного уравнения и сравнения его с допустимым значением и, таким образом, повышают точность АГС. По всем рядам выполняют астрономо-гравиметрическое нивелирование. Кроме того, выделяют основные ряды 1 класса, на которых астрономические пункты располагают более часто (через 40 – 50 км) и вокруг них выполняют особое гравиметрическое сгущение. Координаты АГС вычисляют в единой системе координат 1942 г. с исходным пунктом в центре круглого зала Пулковской обсерватории.

Геодезические сети 2 класса в основном являются сплошной сетью треугольников, заполняющих полигоны АГС 1 класса. Базисные стороны размещают равномерно не более чем через 25 треугольников, одна из базисных сторон должна быть примерно в середине полигона 1 класса, на концах этой стороны определяют пункты Лапласа. При экономической целесообразности сети 2 класса могут создаваться полигонометрическими ходами, образующими сплошную сеть замкнутых полигонов с равномерным расположением пунктов внутри полигона 1 класса. Возможно комбинирование триангуляции и полигонометрии. Схемы сетей полигонометрии и комбинированных сетей триангуляции и полигонометрии разрабатываются отдельно для каждого района с учетом географии, залесенности, рельефа местности и т.п. Горизонтальные углы и длины сторон в полигонометрии 2 класса необходимо измерять с СКО не более 1" (по невязкам замкнутых полигонов) и 1:250000. Метод трилатерации для создания сетей 1 и 2 классов не применяется.

Согласно исследованиям К. Л. Проворова точность передачи азимута и длины стороны в более геометрически жесткой сплошной сети из равно-сторонних треугольников повышается примерно в 3 раза по сравнению с триангуляционным рядом. Поэтому АГС 1 класса менее точна, чем опирающиеся на нее сплошные сети 2 класса: примерная относительная ошибка стороны в слабом месте в АГС 1 класса равна 1:150000, а в сетях 2 класса – 1:200000; СКО взаимного положения смежных пунктов равна 0,15 м в АГС 1 класса и 0,06 м – в сетях 2 – 4 классов.

Уравнивание сетей 2 класса внутри полигонов 1 класса, принимаемых за исходные, приводит к деформации сетей 2 класса. Наиболее заметно искажаются углы на пунктах 2 класса вблизи АГС 1 класса (поправки в углы, получаемые из уравнивания, достигают 5 – 7", т. е. значительно превышают ошибки угловых измерений). Искажение углов и деформация сети по мере удаления от пунктов 1 класса быстро уменьшаются.

Геодезическими сетями 3 и 4 классов сгущают до требуемой плотности сети 2 класса, они могут создаваться методами триангуляции, полигонометрии и трилатерации. Выбирают тот метод, который при обеспечении требуемой точности дает наибольшую экономическую эффективность. При использовании метода полигонометрии между узловыми и исходными пунктами допускается не более двух точек поворота. При расстоянии между ходами менее 4 км в сети 3 класса и менее 3 км в сети 4 класса их необходимо связывать между собой, т. е. прокладывать между ними ход.

На всех пунктах ГГС 1 – 4 классов устанавливают два ориентирных пункта (ОРП) с подземными центрами, расстояния до ОРП составляет 0,5 – 1,0 км (в лесу не менее 250 м). Ориентирные пункты должны быть видны в теодолит, установленный на штативе над центром знака. За один из ОРП можно принимать хорошо видимый с земли геодезический пункт или местный предмет (крест колокольни, шпиль башни и т.п.) при его расстоянии до данного пункта сети не более 3 км. Ориентирные пункты необходимы для азимутальной привязки последующих геодезических построений (полигонометрии 1 и 2 разрядов, теодолитных ходов и т. п.).

Высоты всех пунктов ГГС определяют методами геометрического (в равнинных и всхолмленных районах) и тригонометрического нивелирования. В среднем точность измерения углов построенной ГГС оказалась выше, установленной Основными положениями 1954 – 1961 гг.: 0,65"; 0,75"; 1,1"; 1,5 в сетях 1, 2, 3, 4 классов соответственно. Средняя квадратическая ошибка определения азимутов Лапласа, полученная в результате уравнивания блоков АГС, равна 1,1", т. е. примерно в два раза больше предусмотренной Основными положениями 1954 – 1961 гг.

В целом ГГС по точности обеспечивает картографирование во всех масштабах вплоть до 1:2000 и позволяет решать научные и инженерно-технические задачи.

В настоящее время для построения ГГС применяют спутниковые методы измерений [4].

С этой целью используется концепция построения трех уровней государственной геодезической спутниковой сети. Эта концепция предусматривает построение:

- фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС);
- высокоточной астрономо-геодезической сети (ВАГС);
- спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1).

Фундаментальная АГС реализуется в виде системы закрепленных пунктов со средними расстояниями между ними 700 – 800 км. Часть этих пунктов должна стать постоянно действующими астрономическими обсерваториями, оснащенными радиотелескопами для наблюдений удаленных источников радиоизлучения (квазаров) и спутниковыми приемниками ГРС-ГЛОНАСС. Взаимное положение этих пунктов будет определяться с погрешностью 1 – 2 см.

Высокоточная АГС должна заменить звенья триангуляции 1 класса и представлять собой однородные по точности пространственные построения с расстоянием между смежными пунктами 150 – 300 км. Часть пунктов этой сети будет совмещена с пунктами ФАГС. Взаимное положение таких пунктов будет определяться спутниковыми методами с относительной погрешностью $5 \cdot 10^{-8}$ или 2 – 3 см.

Спутниковая геодезическая сеть 1 класса должна заменить триангуляции 1 и 2 классов со средними расстояниями между пунктами 30 – 35 км и средней квадратической погрешностью взаимного положения 1 – 2 см. Построение такой сети предполагается осуществить в течение десяти ближайших лет.

Сети сгущения строят для дальнейшего увеличения плотности (числа пунктов, приходящихся на единицу площади) государственных сетей. Плановые сети сгущения подразделяют на 1 и 2 разряды. Они могут строиться как спутниковыми, так и традиционными методами.

6.3. Закрепление пунктов плановых геодезических сетей

Пункты геодезических сетей закрепляют на местности специальными знаками – центрами, призванными обеспечить устойчивость и длительную сохранность пунктов.

Вид центра зависит от назначения сети и характера грунта. Официальными нормативными документами [16, 17, 21] установлены типовые конструкции центров, зависящие от класса пункта и местных условий. Они различны для районов сезонного промерзания грунтов, районов многолетней мерзлоты и районов распространения подвижных песков.

На рисунке 6.4 показан центр пункта ГГС 1 – 4 классов для районов сезонного промерзания грунта. Центр представляет собой железобетонный пилон сечением 16×16 см и скрепленный с ним цементным раствором якорь диаметром 50 см и высотой 20 см. Основание центра располагают на 50 см ниже границы наибольшего промерзания грунта, но во всех случаях не менее 1,5 м от поверхности земли. На верху пилон крепится (цементным раствором или приваривается) чугунная марка, на верхней поверхности которой отмечена точка, к которой относятся координаты пункта.

В 1,5 м устанавливают способствующий отысканию центра опознавательный знак – железобетонный столб с укрепленной на нем металлической охранной плитой, обращенной в сторону центра.

До внедрения в геодезическое производство спутниковых технологий над центрами геодезических пунктов устанавливались наружные геодезические знаки – деревянные или металлические сооружения, служащие объектом визирования на пункт и для подъема геодезических приборов над землей. Основными типами наружных знаков являлись пирамида и сигнал (рис. 6.5).

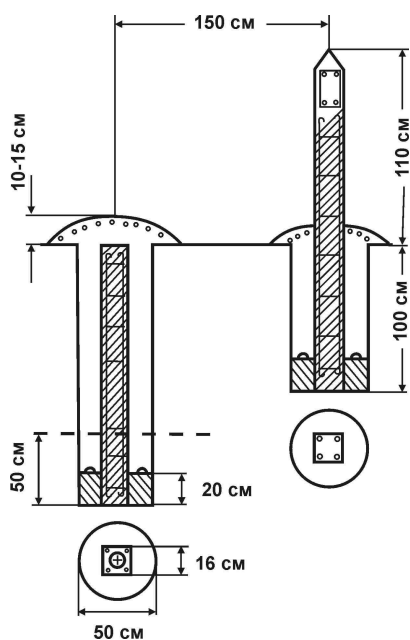


Рис. 6.4. Центр геодезического пункта:
 - - - - - граница промерзания грунта

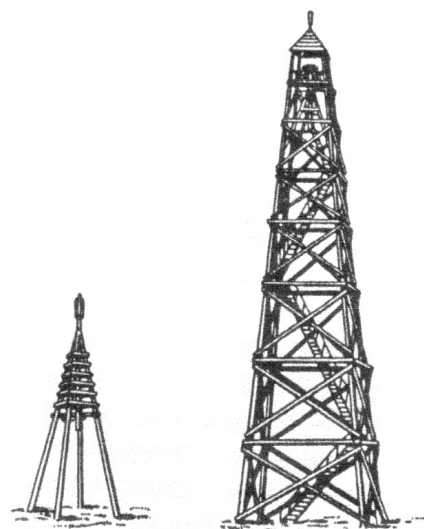


Рис. 6.5. Геодезические знаки:
 слева – пирамида; справа – сигнал

6.4. Государственная нивелирная сеть

Высотные ГГС создают для распространения по всей территории страны единой системы высот. За начало высот в Республике Беларусь, в Российской Федерации и некоторых других странах принят средний уровень Балтийского моря, определение которого проводилось в период с 1825 до 1840 гг. Этот уровень отмечен горизонтальной чертой на медной металлической пластине, укрепленной в устье моста через обводной канал в Кронштадте.

Государственная нивелирная сеть строится по принципу от общего к частному, делится на I, II, III и IV классы, является главной высотной основой топографических съемок всех масштабов и геодезических работ, выполняемых для удовлетворения потребностей народного хозяйства, науки и обороны страны.

Нивелирные сети I и II классов создают единую систему высот на территории страны, их используют для решения научных задач: изучения вертикальных движений земной поверхности и исследования физической поверхности Земли, определения разности высот поверхностей морей и океанов и т. п.

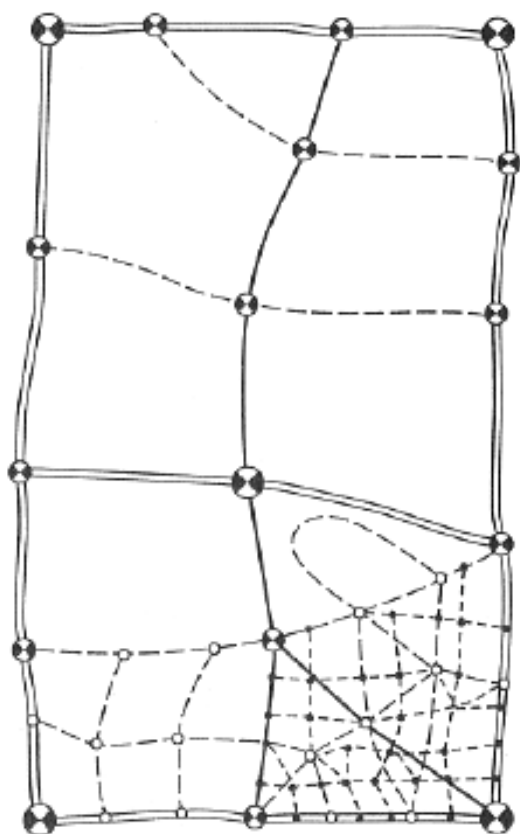
Нивелирная сеть I класса (рис. 6.6.) состоит из замкнутых полигонов периметром 1200 – 2000 км, ходы прокладывают по железным, шоссейным и грунтовым дорогам, в труднодоступных районах – по берегам рек, тропам, зимникам.

Ходы нивелирования II класса опираются на реперы нивелирования I класса, образуют полигоны с периметром 400 – 1000 км. В районах, не имеющих ходов нивелирования I класса, нивелирную сеть II класса строят самостоятельно с таким же периметром. Ходы нивелирования II класса

прокладывают по улучшенным путям сообщений, а при их отсутствии – по берегам морей, больших рек, по тропам и зимникам, их связывают с морскими и речными водомерными установками.

Нивелирные сети III и IV классов создают для выполнения топографических съемок и решения инженерно-геодезических задач. Особо следует отметить высокоточные нивелирные сети на геодинамических и техногенных полигонах, создаваемых для изучения современных движений земной коры, поиска предвестников землетрясений и т. п.

Ходы нивелирования III класса прокладывают внутри полигонов нивелирования I и II классов так, чтобы разделить каждый полигон II класса на 6 – 9 полигонов периметром менее 150 км в обжитых и 300 в малообжитых районах.



⊙ — 1-го класса; ⊕ — 2-го класса;
○ — 3-го класса; * — 4-го класса

Рис. 6.6. Схема государственной нивелирной сети

Ходы нивелирования IV класса прокладывают внутри полигонов нивелирования старших классов с опорой на реперы I – III классов или на узловыe реперы IV класса.

На линиях I, II, III и IV классов закладывают вековые, фундаментальные, фунтовые, скальные, стенные и временные реперы.

Вековые реперы обеспечивают продолжительную сохранность главной высотной основы, позволяют изучать вертикальные движения земной коры и колебания уровней морей и океанов, ими закрепляют места пересечений линий нивелирования I класса. Фундаментальные реперы закладывают на линиях нивелирования I и II классов не реже чем через 60 км (в сейсмоактивных районах – через 40 км), на узловых точках, вблизи морских, речных и озерных уровенных постах. В 50 – 150 м от фундаментального репера закладывают репер-спутник.

Грунтовые, скальные и стенные реперы используют для закрепления нивелирных сетей I, II, III и IV классов. Временные реперы (сохраняются несколько лет) служат высотной основой для топографических съемок, их включают в ходовые линии нивелирования I, II, III и IV классов.

Местоположение реперов опознают на топокартах масштаба 1:100000 – 1:25000 и крупнее и на аэроснимках, их прилагают к материалам нивелирования, по карте определяют геодезические координаты репера (с ошибкой 0,25'). Координаты фундаментальных реперов определяют геодезическими методами с ошибкой не более 1 м.

6.5. Государственная геодезическая сеть Республики Беларусь

Государственная геодезическая сеть Республики Беларусь предназначена для решения следующих основных задач, имеющих хозяйственное, научное и оборонное значение:

- установление и распространение единой системы координат на всю территорию страны и поддержание ее на уровне современных и перспективных требований;
- геодезическое обеспечение картографирования территории страны;
- геодезическое обеспечение изучения земельных ресурсов и землепользования, кадастра, строительства, разведки и освоения природных ресурсов;

- обеспечение геодезическими данными средств наземной и аэрокосмической навигации, аэрокосмического мониторинга природной и техногенной среды;
- изучение поверхности и гравитационного поля Земли и их изменений во времени;
- изучение геодинамических явлений;
- метрологическое обеспечение высокоточных технических средств определения местоположения и ориентирования.

Положение пунктов ГГС определено сочетанием методов триангуляции, полигонометрии, астрономических и спутниковых измерений. По мере совершенствования средств измерений и накопления новых данных ГГС модернизируется. Согласно [1] ГГС Республики Беларусь включает:

- фундаментальную астрономо-геодезическую сеть (ФАГС),
- высокоточную геодезическую сеть (ВГС),
- спутниковую геодезическую сеть 1 класса (СГС-1),
- геодезические сети сгущения.

В основу создания ГГС РБ положен принцип сохранения единства геодезических сетей Беларуси и России (рис. 6.7).

Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть – сеть пунктов, геоцентрические координаты которых определяются методами космической геодезии относительно центра масс Земли с погрешностью не более 10 – 15 см. Расстояния между пунктами 650 – 1000 км.

Высокоточная геодезическая сеть представляет собой пространственное геодезическое построение, опирающееся на пункты ФАГС и обеспечивающее распространение на всю территорию страны геоцентрической системы координат. Пункты ВГС определяются по наблюдениям спутников навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Расстояния между пунктами 150 – 300 км.

Спутниковая геодезическая сеть 1 класса – сеть, обеспечивающая следующую по точности после ВГС реализацию координатной системы, опирающаяся на пункты высокоточной геодезической сети, создаваемая по мере необходимости по спутниковым наблюдениям. Расстояния между пунктами 25 – 35 км.

Характеристики точности рассмотренных выше сетей представлены в табл. 6.1, где D – расстояние между пунктами в км.

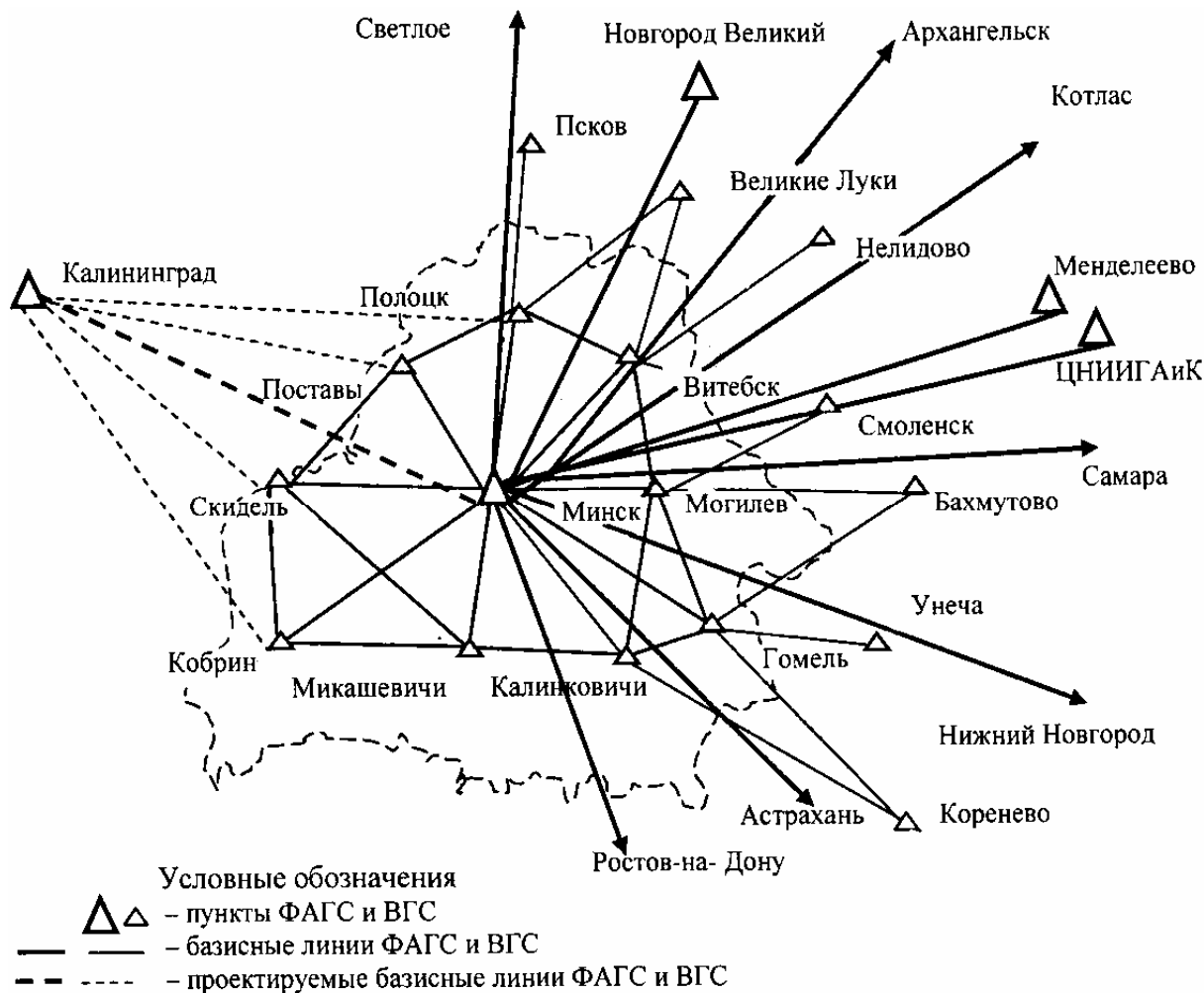


Рис. 6.7. Схема связи ГГС Беларуси и России

Таблица 6.1

Сеть	Расстояние между смежными пунктами, км	Погрешность взаимного положения пунктов	
		по плановым координатам	по высоте
ФАГС	650 – 1000	2 см	3 см
ВГС	150 – 300	$3 \text{ мм} + 0,05 \text{ мм} \cdot D$	$5 \text{ мм} + 0,07 \text{ мм} \cdot D$
СГС-1	25 – 35	$3 \text{ мм} + 0,1 \text{ мм} \cdot D$	$5 \text{ мм} + 0,2 \text{ мм} \cdot D$

Сети сгущения. Там, где требуется дальнейшее сгущение сети (например, в населенных пунктах), опираясь на ГГС, развивают *сети сгущения 1 и 2 разряда*, чем достигается плотность на 1 км^2 не менее 4 пунктов на застроенной территории и 1 пункт на незастроенной территории.

Геодезические сети специального назначения создают в тех случаях, когда требуется особо высокая точность геодезической сети. Геодезическую сеть специального назначения строят в государственной или в местной системе координат. Примерами таких сетей являются создаваемые на железных дорогах реперные системы, которые должны служить основой для всех съемочных и разбивочных геодезических работ, возникающих при проектировании, строительстве и текущем содержании железных дорог, а также для мониторинга пути и сооружений, межевания земель и кадастровой съемки в пределах полосы отвода.

Съемочную сеть создают при выполнении съемки местности. Она развивается от пунктов государственной геодезической сети и сетей сгущения 1 и 2 разрядов. Но при съемке отдельных участков съемочная сеть может быть и самостоятельной, построенной в местной системе координат. В съемочных сетях, как правило, одновременно определяют положение пунктов в плане и по высоте.

Предельные погрешности планового положения пунктов съемочной сети относительно исходных пунктов не должны превышать на открытой местности и на застроенной территории 0,2 мм в масштабе плана и 0,3 мм на местности, закрытой древесной и кустарниковой растительностью.

Координаты пунктов съемочных сетей определяют проложением теодолитных ходов, построением триангуляции, засечками, спутниковым методом и др.

Лабораторная работа № 1

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ТОПОГРАФИЧЕСКИМ КАРТАМ И ПЛАНАМ

Приборы и принадлежности: учебные топографические планы и карты, геодезические транспортиры, циркули-измерители, масштабные линейки.

Литература: [12, 13, 15, 16].

Задание:

1. Вычертить на учебной топографической карте произвольный треугольник со сторонами не менее 5 см.
2. Определить географические и прямоугольные координаты вершин данного треугольника.
3. Определить элементы ориентирования сторон треугольника.
4. Определить отметки вершин треугольника.
5. Определить уклоны по сторонам треугольника.
6. Определить площадь данного треугольника.

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Выкопировку фрагмента топографической карты с вычерченным треугольником.
2. Таблицу определенных в соответствии с заданием данных по шаблону указанному преподавателем.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО МОДУЛЮ 1

Тема 1. Основные сведения и определения.

1. Перечислить задачи современной геодезии.
2. По каким направлениям идет развитие геодезии.
3. Указать связь геодезии с другими науками.
4. Общие задачи инженерной геодезии.

Тема 2. Форма и размеры земли. Системы координат.

1. Современные представления о фигуре Земли.
2. Система географических координат.
3. Система прямоугольных и полярных координат.
4. Сущность проекции К. Гаусса.
5. Какая точка принимается за начало координат в зональной системе?
6. Откуда отсчитывается абсцисса и ордината в зональной системе?
7. Что означают координаты точки $X = 6345123$ м; $Y = 2345678$ м?
8. Понятие абсолютной, относительной высот точек.
9. Как проектируют точки физической земной поверхности на эллипсоид, плоскость?
10. Как вычислить ошибку в измеренном расстоянии без учета кривизны Земли?
11. Как вычислить ошибку в измеренной высоте без учета кривизны Земли?

Тема 3. Ориентирование линий. Прямая и обратная геодезические задачи на плоскости.

1. Что называется дирекционным углом?
2. Что называется румбом?
3. Какая существует связь между прямыми и обратными дирекционными углами, между прямыми и обратными румбами?
4. Какая существует связь между дирекционными углами и румбами?
5. Какая существует связь между дирекционными углами и внутренними углами полигона?

Тема 4. Топографические планы и карты.

1. Что называется планом? Что называется картой?
2. Какие планы и карты называются топографическими?
3. Что называется масштабом?
4. Какой масштаб называется численным, линейным, поперечным?

5. Что называется основанием линейного и поперечного масштабов?
6. Чему равно основание нормального поперечного масштаба?
7. Чему равно наименьшее деление основания нормального поперечного масштаба?
8. Чему равно наименьшее деление нормального поперечного масштаба?
9. Что называется точностью масштаба?
10. В каком масштабе составляются планы для целей строительства?
11. Что называется номенклатурой карт и планов?
12. Карта какого масштаба принимается за основу номенклатуры карт различных масштабов?
13. Какие условные знаки называются масштабные и какие – вне-масштабные?
14. Что называется горизонталями?
15. Что такое высота сечения рельефа?
16. Что называется заложением?
17. Что называется крутизной ската?
18. Для чего на топографических картах строится масштаб заложений?
19. Что называется уклоном линии?
20. Откуда ведется счет высот на топографических картах?
21. Как определяются по карте длины отрезков, азимуты?
22. Как определить по топографическому плану или карте отметку точки и крутизну ската?
23. Как складывается номенклатура листов карт (планов)?
24. Перечислите способы вычисления площадей на планах и картах.
25. Изложите порядок определения площадей аналитическим способом.
26. Изложите порядок определения площадей графическим способом.
27. В каком случае применяют аналитический способ определения площадей?
28. Назовите основные части полярного планиметра.
29. Произведите отсчет по счетному механизму планиметра.
30. Что такое цена деления планиметра и как она определяется?
31. Какова точность определения площадей различными способами?
32. Что такое палетка?
33. Как проконтролировать вычисления при определении площади аналитическим способом?

Тема 5. Элементы теории ошибок измерений.

1. Классификация измерений и ошибок измерений.
2. Какие погрешности называют случайными?
3. Свойства случайных ошибок.
4. Понятие равноточных измерений. Оценка точности по формуле Гаусса.
5. Оценка точности измерений по формуле Бесселя.
6. Оценка точности измерений по разностям двойных измерений.
7. Понятие относительной ошибки.
8. Что является вероятнейшим значением измеренной величины?
9. Понятие неравноточных измерений, арифметической середины.
10. Оценка точности отдельного результата неравноточного измерения.
11. Оценка точности арифметической середины по результатам неравноточных измерений.
12. Последовательность оценки точности равноточных измерений.
13. Что такое предельная погрешность?
14. Как вычислить среднюю квадратическую погрешность функции?
15. Какие измерения называют равноточными?
16. По каким формулам вычисляется средняя квадратическая погрешность отдельного измерения и арифметической середины?
17. Чему равна средняя квадратическая погрешность суммы независимо измеренных величин?

Тема 6. Геодезические сети.

1. Что называется геодезической сетью? В чем состоит основной принцип построения и развития геодезических сетей и как он реализуется на практике?
2. В чем сущность метода триангуляции? Приведите основные формулы определения искомым величин.
3. В чем сущность метода трилатерации? Приведите основные формулы определения искомым величин.
4. В чем сущность полигонометрии? Как вычислить дирекционный угол сторон хода, если известен дирекционный угол исходной стороны и вправо по ходу лежащий угол между этими сторонами?
5. В чем сущность прямой геодезической задачи? При выполнении каких работ она находит применение?
6. В чем сущность обратной геодезической задачи? При выполнении каких работ она находит применение?
7. Как обозначают и закрепляют на местности пункты геодезических сетей?

МОДУЛЬ 2

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Дидактические цели модуля 2

Студент должен знать:	Студент должен уметь:
<ul style="list-style-type: none"> – принципы измерения горизонтальных и вертикальных углов; – назначение, устройство теодолитов; – основные поверки технических теодолитов; – методы линейных измерений; – сущность и методы нивелирования; – поверки нивелиров; – принципы координирования точек GPS-методами; – приборы для GPS-измерений 	<ul style="list-style-type: none"> – выполнять основные поверки и юстировки технических теодолитов; – измерять техническим теодолитом горизонтальные, вертикальные углы и магнитные азимуты; – выполнять поверки и юстировки точных нивелиров; – выполнять обработку результатов технического нивелирования

Учебно-информационный блок модуля 2

Темы занятий и рассматриваемые вопросы	Тип занятия	Вид (форма) занятия
УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ <ul style="list-style-type: none"> – принцип измерения горизонтальных и вертикальных углов; – угломерные приборы, их виды, устройство; – отсчетные устройства; – поверки и юстировки приборов; – способы измерения углов; – точность измерения углов 	<p style="text-align: center;">Приобретение новых научных знаний</p> <p style="text-align: center;">Углубление и систематизация знаний</p>	<p style="text-align: center;">Лекция</p> <p style="text-align: center;">Самостоятель- ная работа</p>
ЛИНЕЙНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ <ul style="list-style-type: none"> – измерение длин линий механическими приборами; – определение недоступных расстояний; – оптические дальномеры, нитяной дальномер; – светодальномеры, электронные тахеометры 	<p style="text-align: center;">Приобретение новых научных знаний</p> <p style="text-align: center;">Углубление и систематизация знаний</p>	<p style="text-align: center;">Лекция</p> <p style="text-align: center;">Самостоятель- ная работа</p>

Темы занятий и рассматриваемые вопросы	Тип занятия	Вид (форма) занятия
<p>НИВЕЛИРОВАНИЕ</p> <ul style="list-style-type: none"> – сущность и методы нивелирования; – геометрическое нивелирование; – нивелиры; – нивелир с уровнем при трубе; – поверки нивелира; – нивелирные рейки; – влияние кривизны Земли и рефракции на результаты нивелирования; – нивелирные сети; – тригонометрическое нивелирование; – сведения о современных нивелирах 	<p>Приобретение новых научных знаний</p> <p>Углубление и систематизация знаний</p>	<p>Лекция</p> <p>Самостоятельная работа</p>
<p>СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ</p> <ul style="list-style-type: none"> – общее понятие о системах спутниковой навигации; – принципы определения координат точек местности с использованием GPS; – измерение расстояний до навигационных спутников GPS; – приемники GPS; – режимы наблюдений 	<p>Приобретение новых научных знаний</p>	<p>Лекция</p> <p>Самостоятельная работа</p>

ТЕМА 7. УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

7.1. Принцип измерения горизонтальных и вертикальных углов

Угловые измерения являются одним из основных элементов производства геодезических работ.

Пусть BAC (рис. 7.1) угол на местности, стороны которого не лежат в горизонтальной плоскости. Горизонтальной проекцией этого угла будет угол bac , полученный проецированием сторон AB и AC на горизонтальную плоскость.

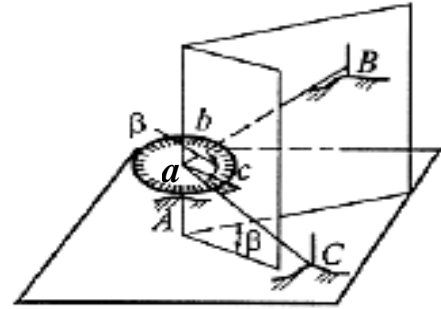


Рис. 7.1. Схема измерения горизонтальных углов

Следовательно, горизонтальный угол образуется в результате ортогонального проецирования на горизонтальную плоскость угла местности, составленного двумя направлениями, исходящими из вершины угла (*горизонтальный угол – это линейный угол, являющийся мерой двугранного угла, образованного вертикальными плоскостями, проходящими соответственно через стороны AB и AC угла BAC*).

Пусть необходимо измерить угол BAC . Через направления AB и AC проводят вертикальные плоскости, которые при пересечении с горизонтальной плоскостью образуют искомый угол β . Для его измерения необходим угломерный круг со шкалой, который должен быть установлен горизонтально и таким образом, чтобы его центр находился на отвесной линии, проходящей через вершину измеряемого угла. Если на этом круге получить следы его сечения вертикальными плоскостями b и c и взять отсчеты в этих точках относительно нулевого деления, то искомый угол будет получен как разность дуг окружностей O_C и O_B , и, следовательно, как разность отсчетов.

Для горизонтального угла (см. рис. 7.1) при нанесении делений дуги по часовой стрелке, угол β получается как разность двух угловых направлений: $\beta = O_C - O_B$. Здесь O_B и O_C – угловые значения направлений AB и AC от начала деления дуги окружности, которые называют *отсчетами*.

Таким образом, получаем:

Правило 1. Чтобы по отсчетам получить величину горизонтального угла, к которому стоишь лицом, необходимо от углового значения

правого направления (отсчета на правую точку) отнять значение левого направления (отсчет на левую точку). Если правое значение меньше, к нему обязательно добавить значение полной окружности (если мера градусная – 360°). При изменении порядка в вычитании получим угол – дополнение до полной окружности. Угол, к которому стоишь лицом, принято называть *внутренним*, а его дополнение до полной окружности – *внешним*.

Для измерения вертикальных углов используется угломерный круг, вращающийся в вертикальной плоскости, проходящей через направление «станция *A*» – «визирная цель *B*».

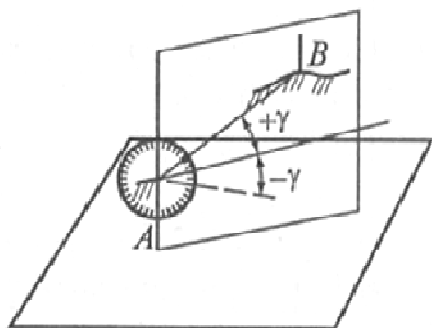


Рис. 7.2. Схема измерения вертикальных углов

В качестве одного из направлений принимается строго горизонтальная или строго вертикальная линия. Деление вертикальной окружности, кроме единиц, имеет еще и неоднозначность в направлении и знаке. Вертикальный угол ν относительно горизонтальной плоскости называют *углом наклона* (наклонения). В общем случае, (рис. 7.2) угол наклона ν есть угловое значение направления *A – B* относительно принятой за исходную (на рис. 7.2 горизонтальную) линию или *отсчет* на точку *B*.

7.2. Угломерные приборы, их виды, основное устройство

Самый распространенный прибор, используемый для измерения горизонтальных и вертикальных углов называется *теодолитом*. Это название ввел в XIV веке англичанин Л. Диггс.

Для выполнения измерений малой точности используются *буссоли*, *гониометры*. Эти приборы применяют в геологии, лесном хозяйстве и других областях, не требующих большой точности измерения.

В качестве основной классификации выделим деление теодолитов по *точности*: *высокоточные* (Т05, Т1), *точные* (Т2, Т5), *технические* (Т15, Т30). Согласно существующему стандарту теодолиты маркируются буквой Т или сокращением, начинающимся с этой буквы – Theo, Th и т.д. Следующая цифра всегда показывает *точность* в секундах однократного измерения угла.

Теодолиты изначально различали по *материалу* изготовления кругов на *металлические* (типа ТТ5) и *стеклянные*, на основе которых созданы современные оптические теодолиты с оптической системой снятия отсчетов. Кроме того, выделяли *простые теодолиты* – лимб жестко скреплен с подставкой (основная изначально модель) и *повторительные*, когда лимб и алидада могут вращаться как вместе, так и по отдельности.

Следующие за точностью буквы в маркировке теодолита говорят о наличии каких-либо *дополнительных* устройств в приборе. Например, ТТП – *теодолит-тахеометр проектировочный*, имел насадку для визирования на большие расстояния и накладной уровень на трубе для более точного горизонтирования визирной оси; Т5К – *точный теодолит с компенсатором* при вертикальном круге для сохранения места нуля при любом наклоне трубы; ЗТ30П – *теодолит технической точности с прямым изображением*, т. к. все базовые модели с маркировкой Т имеют обратное (перевернутое) изображение в поле зрения трубы.

При измерении углов теодолит с помощью станového винта прикрепляется к штативу, представляющему собой треногу с металлической головкой. Для центрирования теодолита, т. е. для установки центра лимба над вершиной измеряемого угла, служит отвес.

Теодолит состоит из подставки, горизонтального круга, вертикального круга, зрительной трубы, уровней, отсчетного устройства.

Подставка 2 (рис. 7.3) устанавливается на *три подъемных винта 1*, которые используются для изменения наклона прибора (горизонтирования). В отверстие подставки входит *ось 11 вращения лимба горизонтального круга 3*, в которую, в свою очередь, входит *ось 10 алидады горизонтального круга 4*. На алидаде расположены две *подставки 5*, несущие *ось вращения (НН) зрительной трубы 8* с *алидадой 6* и *лимбом 7 вертикального круга*. На защитном корпусе алидады горизонтального круга укреплен *цилиндрический уровень 9*. При измерениях прибором различают два положения: когда вертикальный круг на колонке находится с левой стороны – положение *круг лево (КЛ)*, когда справа – *круг право (КП)*. *Горизонтальный круг* состоит из лимба и алидады. *Лимб* – рабочая мера теодолита – представляет собой стек-

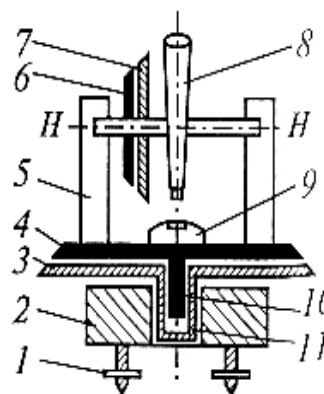


Рис. 7.3. Общая схема теодолита

лянный круг с делениями. У разных лимбов – разная цена деления. *Цена деления* – величина наименьшего деления лимба, т. е. расстояние в градусной мере между соседними делениями лимба (у Т30 – 10′, у 2Т30 – 5′).

Алидада – часть прибора, расположенная соосно с лимбом, на которой имеются элементы отсчетного устройства (индекс для фиксации отсчета по лимбу). Алидада горизонтального круга вращается со всей верхней частью прибора. На ней расположен цилиндрический уровень. Для исключения влияния *эксцентриситета алидады*, т. е. несовпадения центра алидады с центром лимба, теодолиты снабжаются двумя верньерами, расположенными на противоположных сторонах диаметра алидады. Среднее из отсчетов по двум верньерам будет свободно от влияния эксцентриситета.

Вертикальный круг состоит из лимба и алидады. Алидада вертикального круга неподвижна, лимб вращается вместе со зрительной трубой. Некоторые особенности при делении вертикального круга связаны с правилом: вертикальный угол выше горизонта считают положительным, а ниже – отрицательным. Исходя из этого лимб вертикального круга теодолита 2Т30 разбит на положительный (60°) и отрицательный (55°) сектора. У теодолита Т30 разбивка сплошная от 0 до 360°.

Зрительная труба теодолита (рис. 7.4) представляет собой визирное устройство, содержащее объектив, окуляр и сетку нитей. По конструкции различают трубы с внешней и внутренней фокусировкой. В современных теодолитах применяют зрительные трубы только с внутренней фокусировкой. Эти трубы характеризуются меньшими размерами, герметичностью, постоянством положения визирной оси [12].

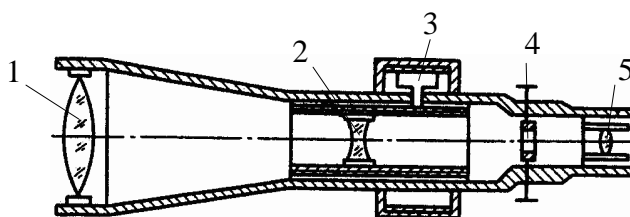


Рис. 7.4. Разрез зрительной трубы теодолита

В такой трубе между *объективом 1* и *окуляром 5* находится *двояковогнутая фокусирующая линза 2* (см. рис. 7.4). Вблизи окуляра помещается *металлическое кольцо*, называемое *диафрагмой*, со *стеклянной пластинкой 4*, на которой награвированы тонкие штрихи, составляющие сетку нитей. Установка трубы для наблюдений складывается из установки ее по

глазу и по предмету. Установка трубы по глазу заключается в получении резкого изображения сетки нитей. Установка трубы по предмету заключается в получении резкого изображения наблюдаемого предмета, для чего производится фокусирование трубы или совмещение изображения предмета, даваемого объективом, с плоскостью сетки нитей. Фокусировка трубы производится вращением *кремальеры* 3. Увеличение трубы теодолита 2Т30 равно 20^{\times} , теодолита Т15 – 25^{\times} .

Сетка нитей (рис. 7.5) крепится *юстировочными винтами* 1 (4 штуки) к *диафрагме* 2, а диафрагма *винтами* 3 (4 штуки) к корпусу трубы.

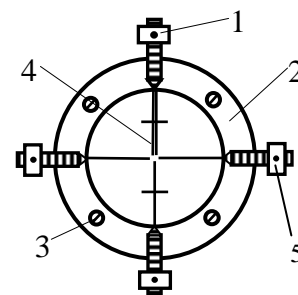


Рис. 7.5. Сетка нитей

Точка пересечения горизонтального и вертикального штрихов 4 называется *перекрестием сетки нитей*. Два горизонтальных коротких штриха, расположенных выше и ниже перекрестия, являются *дальномерными нитями* и служат для определения расстояний. У большинства теодолитов одна половина вертикальной нити вместо одного имеет два вертикальных штриха, которые образуют *биссектор*. При наблюдении удаленных точек местности их изображение устанавливается посередине между этими штрихами.

Уровни служат для приведения осей или плоскостей прибора в горизонтальное или отвесное положение. В геодезических приборах применяются уровни двух типов: цилиндрические и круглые.

Цилиндрический уровень (рис. 7.6) состоит из стеклянной трубки 1, заполненной спиртом или эфиром, и запаянной с другого конца. После охлаждения жидкость сжимается и образуется небольшое пространство, называемое пузырьком уровня. Трубка уровня заключена в оправу 2, снабженную одним или двумя исправительными винтами 3. На верхней части трубки нанесена шкала делений.

Цена деления уровня зависит от радиуса дуги уровня. Чем больше радиус, тем меньше цена деления уровня и тем он чувствительнее. В современных теодолитах применяются цилиндрические уровни с ценой деления от 10 до 60" в зависимости от точности прибора. Ось цилиндрического уровня А-А проходит по касательной к внутренней поверхности ампулы, когда пузырек находится в середине (точке нуль-пункта).

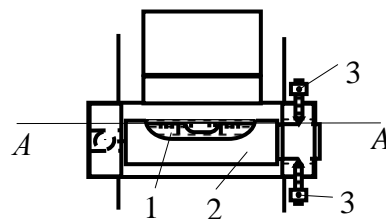


Рис. 7.6. Цилиндрический уровень

Круглый уровень представляет собой стеклянную ампулу круглой формы, верхняя внутренняя часть которой имеет сферическую поверхность. Снаружи, на поверхности ампулы, нанесены штрихи в виде концентрических окружностей. Центральная точка этих окружностей является нуль-пунктом. За *ось круглого уровня* принимают прямую, проходящую через нуль-пункт перпендикулярно плоскости, касательной к внутренней поверхности ампулы уровня в его нуль-пункте. Чувствительность круглого уровня заметно ниже, чем цилиндрического. *Цена деления* этого уровня порядка 3 – 5'.

В современных электронных геодезических приборах наряду с жидкостными уровнями используются *электронные*. Принцип действия электронного уровня – выявление разности каких-либо электрических характеристик (сопротивление, напряжение и других) на двух концах какой-либо базы, если она не занимает горизонтальное положение и таким образом, например, одним концом глубже, чем другим, погружена в индукционную катушку.

Теодолит технической точности 2Т30. Более подробное изучение современных теодолитов целесообразно начать с базовой модели прибора *технической точности Т30* в виде его модификации 2Т30 (рис. 7.7). Прибор относится к классу *оптико-механических, повторительных, с внутренней фокусировкой и односторонним снятием отсчетов*. Имеет *круглое основание 1 с крепежными кольцами 2 и пластинкой 3*, в котором крепится в *пазы 4 треугольная подставка (треггер) 5 с тремя подъемными винтами 6* для изменения горизонтальности прибора. На *треггере* имеется *зажимной винт 7 и наводящий винт 8* лимба. Заметим, что зажимной и наводящий винты всегда существуют в паре. В *отверстие 9 треггера* вставляется основная часть прибора, состоящая из *горизонтального круга 10, алидады с колонками 11, вертикального круга 12, подсвечного зеркала 13, зажимного 14 и наводящего 15 винтов трубы, зажимного 16 и наводящего 17 винтов алидады, цилиндрического уровня 18, фокусирующей кремальеры трубы 19, втулки вращения прибора 20 и посадочного паза 21 для буссоли*. Между колонками алидады крепится *оптическая зрительная труба с объективом 22, окуляром 23, микроскопом отсчетного устройства 24, кремальерой фокусировки сетки нитей 25, кремальерой фокусировки отсчетного устройства 26 и коллиматорным визиром 27*. На общем виде прибора (рис. 7.8) можно увидеть *цилиндрический уровень 28 при трубе и исправительные винты 29 цилиндрического уровня при трубе*.

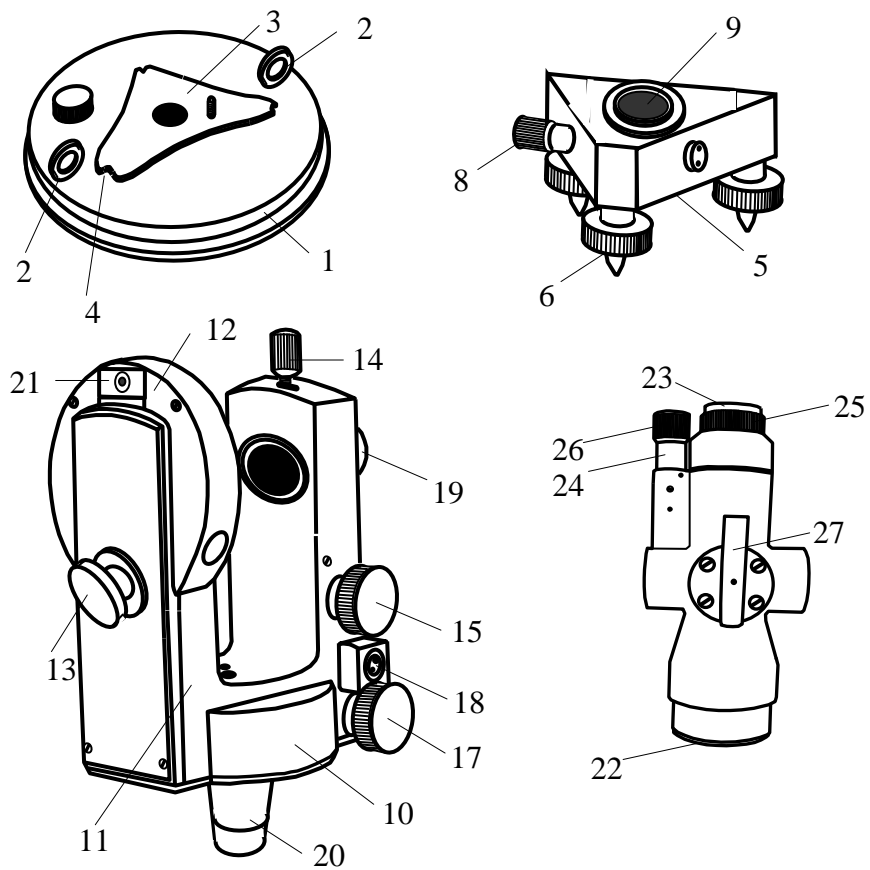


Рис. 7.7. Основные части теодолита 2Т30

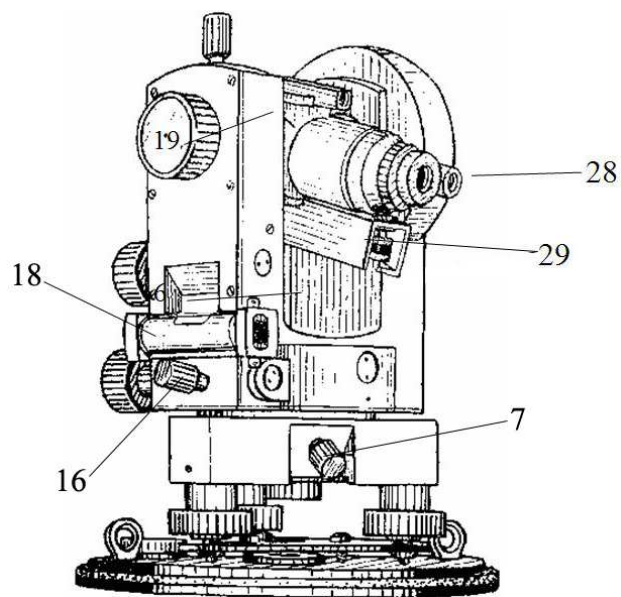


Рис. 7.8. Общий вид теодолита 2Т30

Перечислим некоторые основные характеристики теодолита 2Т30:

▪ средняя квадратическая погрешность измерения угла одним приемом:	
– горизонтального	20"
– вертикального	30"
– превышения (на 100 м)	15 мм
▪ пределы измерения вертикальных углов	+60...–55°
▪ увеличение зрительной трубы	20 ^x
▪ поле зрения	2°
▪ пределы визирования	1,2 м ... ∞
▪ цена деления лимбов	1°
▪ цена делений шкал микроскопов	5'
▪ цена деления уровня:	
– при алидаде	45"
– при трубе	20"
▪ масса теодолита (без футляра)	2,3 кг

7.3. Поверки и юстировки приборов

Общие положения проверок теодолита. Для получения с помощью теодолита неискаженных результатов измерений все его механические и оптические системы должны быть качественно собраны и соответствующим образом *ориентированы* в пространстве друг относительно друга [7].

Неправильное взаимное расположение оптических и механических систем прибора выявляется специальными действиями, которые называют *поверками* прибора, а устраняется действиями, называемыми *юстировкой* (регулировкой).

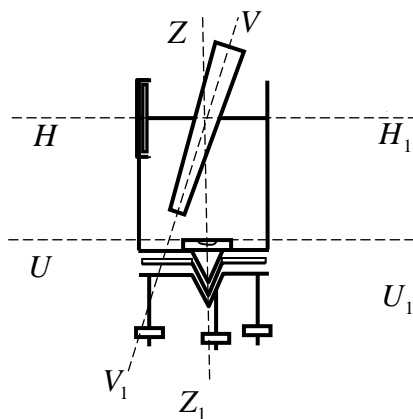


Рис. 7.9. Система осей теодолита

Оси теодолита связывают геометрическими условиями, выполнение которых и будет говорить об исправном функционировании каждого из принципов построения теодолита как прибора для измерения углов.

К основной системе осей (рис. 7.9), относят:

- ось вращения прибора $Z-Z_1$,
- ось вращения трубы $H-H_1$,
- ось цилиндрического уровня $U-U_1$,
- визирная ось трубы $V-V_1$.

Рассмотрим подробно *процедуры выполнения основных проверок.*

Внешний осмотр: комплектность, отсутствие механических повреждений, чистота поля зрения оптических систем и угломерных кругов и т.д. Имеющиеся недостатки по возможности необходимо исправить.

Проверка взаимодействия узлов: плавность вращения зрительной трубы, алидады, алидады с лимбом, всех винтов, в том числе закрепительных и фокусировочных.

Проверки по геометрическим условиям делят на *проверки установки прибора, проверки визирования и проверки дополнительных средств.*

Проверки установки теодолита содержат *проверку цилиндрического уровня и проверку равновеликости подставок.* Проверки визирования содержат *проверки сетки нитей, коллимационной погрешности и места нуля.* Из дополнительных устройств при необходимости использования проверяют или исследуют *нитяной отвес, уровень при зрительной трубе, нитяной дальномер и ориентир-буссоль.*

Проверка цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга.

Геометрическое условие: ось цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга должна быть перпендикулярна к вертикальной оси вращения прибора.

Устанавливают уровень параллельно линии, соединяющей любую пару подъемных винтов подставки, например, положение *а* (рис. 7.10) и, вращая винты в противоположные стороны, приводят пузырек уровня в *нуль-пункт.* Поворачивают алидаду на 180° , положение *б*, и определяют величину отклонения пузырька от *нуль-пункта* в делениях ампулы *n.* Если величина отклонения *не более чем 2 деления,* то делается вывод о выполнении условия. При большем отклонении проверку необходимо повторить еще хотя бы раз, чтобы убедиться, что уровень разъюстирован.

Исправляют положение пузырька при помощи *исправительного винта* уровня перемещением к *нуль-пункту* на половину величины отклонения, оставшееся отклонение пузырька от *нуль-пункта* ликвидируют подъемными винтами подставки теодолита. Затем проверку повторяют.

Проверка равновеликости подставок.

Геометрическое условие: ось вращения зрительной трубы должна быть перпендикулярна вертикальной оси теодолита.

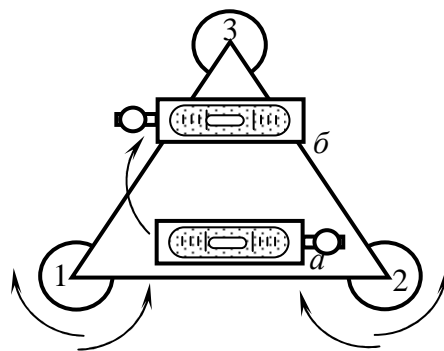


Рис. 7.10. Проверка цилиндрического уровня

Ход выполнения поверки:

1. Устанавливают теодолит на расстоянии 2 – 3 м от стены и приводят его в горизонтальное положение.
2. Отмечают на стене точку, расположенную под углом в $25 - 30^\circ$ к горизонтальной плоскости.
3. Визируют теодолит на точку при одном положении круга (КЛ или КП).
4. Опускают трубу прибора приблизительно до горизонтального положения и отмечают на стене точку в центре сетки нитей.
5. Повторяют пункты 3) и 4) при другом положении круга.
6. Определяют величину смещения центра сетки нитей относительно отмеченной точки по биссектору.
7. Разность между значениями смещений не должна превышать 0,5 ширины биссектора.

Вывод: выполнение условия поверки позволяет производить прибором проецирование в горизонтальной и вертикальной плоскостях и без заметных искажений измерять горизонтальные углы, вершины которых располагаются на разных высотах. Однако работать прибором с данной неисправностью можно, необходимо лишь все измерения выполнять при двух положениях круга.

Поверка сетки нитей.

Геометрическое условие: вертикальная нить сетки нитей должна быть отвесна (или вертикальная нить сетки нитей должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси вращения теодолита).

Приведя вертикальную ось теодолита в отвесное положение, наводим зрительную трубу на нить свободно висящего отвеса (рис. 7.11). Если нить сетки совпадает с нитью отвеса, то условие выполнено.



Рис. 7.11. Поверка сетки нитей:
а – условие выполняется, б – условие не выполняется

Вывод: условие для сетки нитей прямо не вытекает из принципов измерения углов, но необходимо для удобства визирования, т.к. при его невыполнении визировать можно только центром сетки нитей.

Положение *сетки нитей* 4 исправляют поворотом *диафрагмы* 2 с сеткой (рис. 7.5) вокруг визирной оси трубы после ослабления *винтов* 3 до совпадения нитей отвеса и сетки. После исправления винты закрепляют.

Проверка коллимационной погрешности.

Геометрическое условие: визирная ось трубы должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси вращения теодолита, т.е. плоскости визирования должны быть отвесны.

Разность отсчетов, произведенных на одну точку при *КЛ* и *КП* должны отличаться ровно на 180° . Отклонение от 180° не должно превышать двойной точности прибора (рис. 7.12).

Выполнение: устанавливают с помощью уровня ось вращения теодолита в отвесное положение. Наводят центр сетки нитей на удаленную четкую цель, расположенную примерно на одной высоте с теодолитом, и берут отсчеты по горизонтальному кругу при *КЛ₁* и *КП₁*. Затем, открепив лимб, поворачивают теодолит на 180° , и приводят ось вращения теодолита в отвесное положение. Наведя центр сетки нитей на ту же точку, получают отсчеты по горизонтальному кругу *КЛ₂* и *КП₂*.

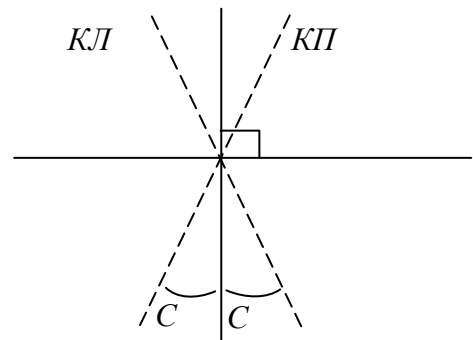


Рис. 7.12. Коллимационная погрешность

Уточненное значение *коллимационной погрешности* *C* вычисляем по формуле

$$C = \frac{(КЛ_1 - КП_1 \pm 180^\circ) + (КЛ_2 - КП_2 \pm 180^\circ)}{4}. \quad (7.1)$$

Абсолютная величина *C* не должна превышать допуска: для приборов технической точности это удвоенная точность прибора, т. е. $1'$ для теодолита 2Т30.

Выводы: при выполнении условия центр сетки нитей совпадает с оптической осью, т. е. возможно точное визирование и не будет искажений в отсчетах при измерении углов. Если величина *C* превышает установлен-

ный для прибора допуск, то вычисляют отсчет по лимбу – $KЛ_{испр.}$, свободный от коллимационной погрешности

$$KЛ_{испр.} = KЛ - C = \frac{2KЛ - (KЛ - КП \pm 180^\circ)}{2} = \frac{(KЛ + КП \pm 180^\circ)}{2}. \quad (7.2)$$

Таким образом, исправленный отсчет есть среднее из двух отсчетов при $KЛ$ и $KП$. Аналогично получают отсчет $KП_{испр.}$.

$$KП_{испр.} = KП + C = \frac{(KЛ + КП \pm 180^\circ)}{2}. \quad (7.3)$$

Затем наводящим винтом алидады устанавливают на лимбе горизонтального круга вычисленный отсчет. При этом центр сетки нитей зрительной трубы сместится с изображения точки, т. к. визирная ось повернется на угол C . Действуя *боковыми исправительными винтами 5* сетки нитей (рис. 7.5) при слегка расслабленных *вертикальных винтах 1*, совмещают центр сетки нитей с изображением точки.

По окончании юстировки поверку повторяют, чтобы убедиться в том, что после исправления коллимационная ошибка не превышает установленного допуска.

Определение погрешности места нуля.

Геометрическое условие: место нуля ($M0$) должно быть величиной близкой к нулю и постоянной.

Место нуля – это отсчет по вертикальному кругу при горизонтальном положении визирной оси трубы и приведенном в нуль-пункт пузырьке уровня при алидаде вертикального круга. Место нуля, как и погрешность C исправного теодолита, есть величина постоянная. Поэтому вычисленные из нескольких определений значения места нуля у одного и того же теодолита *не должны отличаться более чем на удвоенную точность отсчитывания по вертикальному кругу.*

Выполнение: после приведения оси вращения прибора в отвесное положение наводят визирную ось на одну и ту же четкую точку при двух положениях вертикального круга. С помощью одного из подъемных винтов подставки приводят в нуль-пункт пузырек уровня при алидаде вертикального круга и берут отсчеты по вертикальному кругу при $KЛ$ и $KП$. Значение места нуля вычисляют по формулам:

– для теодолита Т30:

$$M0 = \frac{(KП + KЛ \pm 180^\circ)}{2}; \quad (7.4)$$

– для теодолита 2Т30:

$$M_0 = \frac{KL + KP}{2}. \quad (7.5)$$

Выводы: место нуля может иметь любое значение. Важно, чтобы при измерении вертикальных углов оно оставалось постоянным. Для удобства вычислений желательно, чтобы место нуля было близким, а еще лучше равным нулю. Равенство нулю величины M_0 говорит о совпадении центра сетки нитей по вертикали с оптической осью теодолита и, таким образом, позволяет получать точные отсчеты для определения значений вертикальных углов.

Место нуля можно привести к значению $0^{\circ}00'$ следующим образом. Как и для коллимационной погрешности вычисляют отсчеты, свободные от влияния места нуля:

$$O = KL + KP - 2M_0 = (KL - M_0) + (KP - M_0),$$

где в скобках – исправленные отсчеты, уничтожающие влияние M_0 .

Подставив значения исправленных отсчетов в формулу (7.2), имеем

$$KL_{испр.} = KL - M_0 = \frac{2KL - (KL + KP)}{2} = \frac{KL - KP}{2} = v, \quad (7.6)$$

где v – угол наклона.

Аналогичным образом получают исправленный отсчет для круга право. Исправленный отсчет, равный углу наклона v , наводящим винтом трубы устанавливают на шкале вертикального круга. При этом пузырек уровня горизонтального круга должен находиться в *нуль-пункте*. Средняя нить сетки сойдет с изображения точки. Слегка ослабив *винты 5* (рис. 7.5), *вертикальными исправительными винтами 1* сетки нитей смещают сетку так, чтобы ее горизонтальная нить опять совпала с изображением точки визирования.

Теодолит технической точности Т30 и его модификации имеют три дополнительных устройства: *цилиндрический уровень* при зрительной трубе, присоединяющуюся к вертикальному кругу ориентир-буссоль и встроенный в зрительную трубу нитяной дальномер. Очевидно, что при их использовании требуется проверять правильность их работы.

7.4. Отсчетные устройства

При измерении углов теодолитом делаются отсчеты по лимбу. В оптических теодолитах для отсчитывания по лимбу применяют *микроскопы штриховые* (ТЗ0) и *шкаловые* (2ТЗ0) [14]. В верхней части поля зрения штрихового микроскопа, обозначенного буквой **В**, видны штрихи вертикального круга, в нижней части, обозначенной буквой **Г**, – штрихи горизонтального круга. Оцифровка делений шкалы как вертикального, так и горизонтального кругов выполнена через 1° . Между подписанными штрихами нанесено 6 делений, следовательно, цена деления лимба равна $10'$. Отсчет по лимбу проводится относительно индекса, общего для шкал обоих кругов, с оценкой десятых долей наименьшего деления лимба на глаз, т. е. с точностью до $1'$. На рисунке 7.13, а отсчет по лимбу горизонтального круга равен $37^\circ 38'$, отсчет по лимбу вертикального круга – $218^\circ 43'$.

В теодолите 2ТЗ0 вместо штрихового микроскопа применен шкаловый микроскоп. Цена деления лимба в этом теодолите как у горизонтального, так и у вертикального кругов равна 1° . Доли деления лимба оцениваются с помощью шкалы, длина которой равна одному делению лимба, т. е. $60'$. Шкала содержит 12 делений, следовательно, одно деление шкалы соответствует $60' : 12 = 5'$. Доли деления оцениваются на глаз с точностью до 0,1 деления, что составляет $0,5'$. На рисунке 7.13 отсчет по лимбу горизонтального круга равен $276^\circ 06,0'$.

Отсчеты по вертикальному кругу у прибора 2ТЗ0 зеркальны относительно горизонтальной линии лимба, поэтому снятие отсчетов при отрицательных значениях углов производятся не слева направо (от 0 до 6), как для положительных, а справа налево (от -0 до -6). На рисунке 7.13, б отсчет по лимбу вертикального круга равен $-11^\circ 16,0'$. При положительном значении градусов, находящихся на шкале, отсчет по вертикальному кругу был бы $11^\circ 44'$.

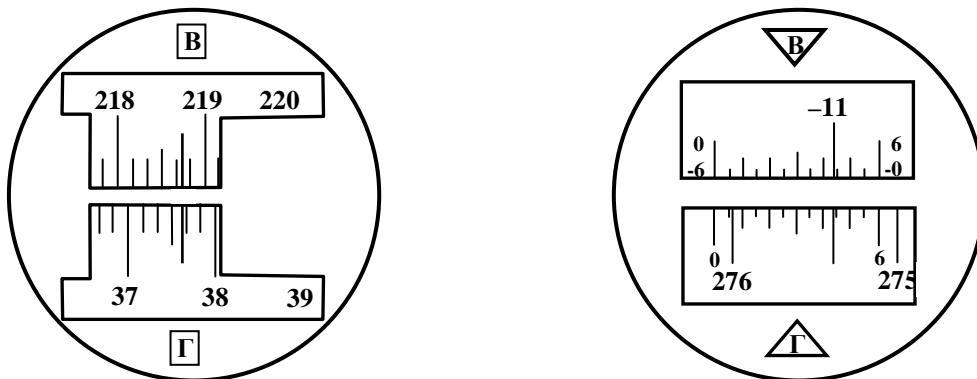


Рис. 7.13. Отсчетные устройства технических теодолитов:
а) штриховой микроскоп; б) шкаловый микроскоп

7.5. Способы измерения углов

Общие положения измерений углов. Чтобы измерить углы теодолитом необходимо:

1. Совместить вертикальную ось вращения теодолита с вершиной измеряемого угла с использованием поверенного нитяного отвеса – выполнить *центрирование*.

2. Привести плоскость лимба горизонтального круга в горизонтальное положение, используя цилиндрический уровень, т.е. выполнить его *горизонтирование*.

3. Получить отсчеты на точки образующие угол и по ним вычислить значение определяемого угла. Измерения нужно выполнять с контролем полученных результатов.

Эти пункты характерны как для измерения как горизонтального, так и вертикального угла. Пункт 3 изменяется в зависимости от используемого способа измерений.

При измерении горизонтальных углов в геодезии выделяют *четыре основных способа*:

- 1) способ приемов;
- 2) способ приемов с перестановкой лимба;
- 3) способ повторений;
- 4) способ круговых приемов.

Наибольшее распространение получил способ приемов.

Способ приемов используется, когда необходимо измерить отдельный горизонтальный угол.

Сначала выполняют два первых пункта, а *отсчеты* получают в следующей последовательности:

– визируют и снимают отсчет на правое направление угла (рис. 7.14) при круге лево (KL_1);

– визируют и снимают отсчет на левое направление угла при круге лево (KL_2);

– переводят трубу через зенит, визируют и снимают отсчет на левое направление угла при круге право ($KП_2$);

– возвращаясь к исходному направлению, визируют и снимают отсчет на правое направление угла при круге право ($KП_1$).

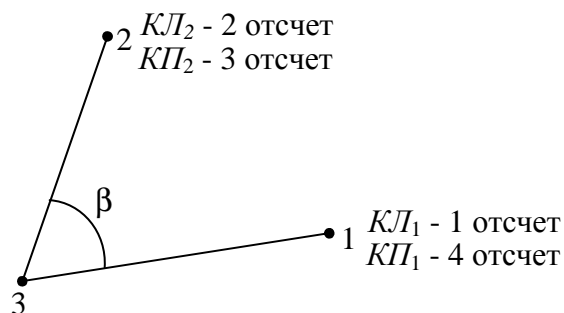


Рис. 7.14. Схема измерения горизонтального угла способом приемов

При такой схеме измерений углов общее значение угла складывается из двух значений, полученных по общему правилу при двух положениях вертикального круга (из двух *полуприемов*):

$$\beta_1 = КЛ_1 - КЛ_2:$$

$$\beta_2 = КП_1 - КП_2.$$

Таким образом, производится *двойной контроль измерений*: по отсчетам и по значению угла из полуприемов. Два полуприема образуют *полный прием*. Результаты измерений записывают в стандартный журнал, в котором производят все вычисления и контроли. Например, для рис. 7.14 вычисления выполнены в табл. 7.1.

Таблица 7.1.

Станция	Наведение	Круг	Отсчет		Угол из п/п		Среднее	
			°	'	°	'	°	'
3	1	КЛ	76	51 (1)	54	18 (1-2)	54	18.5
		КП	256	52 (4)				
	2	КЛ	22	33 (2)	54	19 (4-3)		
		КП	202	33 (3)				

Здесь значения в скобках – номера отсчетов по порядку:

$$\beta_{КЛ} = (1) - (2) = 76^\circ 51' - 22^\circ 33' = 54^\circ 18';$$

$$\beta_{КП} = (4) - (3) = 256^\circ 52' - 202^\circ 33' = 54^\circ 19'.$$

Расхождение значений угла из полуприемов не должно превышать двойной точности отсчета. Так как разность $\beta_{КЛ} - \beta_{КП}$ не превышает $1'$ (*контроль по углам* из полуприема выполнен), то окончательное значение угла вычисляют как среднее арифметическое:

$$\beta = \frac{\beta_{КЛ} + \beta_{КП}}{2} = 54^\circ 18,5'.$$

Контроль по отсчетам также выполнен: разность между (1) и (4) отсчетами (т. е. на одну точку при разных кругах) $180^\circ 01'$, а между (2) и (3) – 180° . Колебание разностей в $1'$ и дало расхождение в углах между полуприемами – $1'$.

Способ приемов с перестановкой лимба отличается от обычного способа приемов тем, что перед переходом от круга лево к кругу право открепляют лимб и переводят алидаду на угол порядка 90° . Далее лимб закрепляют, открепляют алидаду и выполняют второй полуприем. В данном способе разность отсчетов, произведенных на одну точку при *КЛ* и *КП*, будет отличаться на 180° плюс неизвестный угол поворота. Дальнейшие действия аналогичны способу приемов.

Для повышения точности измерения угла теодолитом Т30 увеличивают число приемов. При этом нет необходимости выполнять более 3 приемов.

Способ круговых приемов используется, когда из одной вершины исходят более 2 направлений и требуется получить значения углов между некоторыми (или всеми) из них. В этом случае поступают следующим образом. Установив теодолит над точкой, визируют и берут отсчеты последовательно на все направления по ходу часовой стрелки. Последнее наведение делают на начальное направление, чтобы убедиться в неподвижности лимба. Величина несовпадения отсчетов на начальное направление называется *незамыканием горизонта* и на нее накладывается допуск. Допустимое незамыкание определенным образом распределяется между измеренными направлениями. Эти действия составляют первый полуприем. Во втором полуприеме меняют круг, переводя трубу через зенит, и последовательно визируют на все направления, но против хода часовой стрелки. В зависимости от требуемой точности выполняют определенное количество приемов.

Измерение вертикальных углов также начинают с центрирования и горизонтирования теодолита, т. к. исходным (основным) направлением при измерении является горизонтальное. Начальный индекс, относительно которого производят отсчеты по вертикальному кругу, приводится в горизонтальное положение уровнем при горизонтальном круге. Уровень скреплен с алидадой так, что его ось установлена параллельно коллимационной плоскости зрительной трубы.

Центр сетки нитей наводят на наблюдаемую точку, и после приведения подъемными винтами уровня при алидаде в нуль-пункт снимают отсчеты при разных положениях круга. Отсчеты ведут по шкалам, нанесенным на вертикальный круг теодолита. С горизонтальным направлением визирной оси трубы совпадает целое число градусов: 0° , 90° . Для теодолита Т30 значение угла наклона вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned}v &= \frac{KL - KP}{2}; \\v &= KL - M0; \\v &= M0 - KP.\end{aligned}\tag{7.7}$$

7.6. Точность измерения углов

Основные погрешности угловых измерений напрямую связаны с этапами измерения угла и могут быть собраны в три неравнозначных группы:

1) погрешности, связанные с процедурой центрирования прибора над вершиной измеряемого угла;

- 2) инструментальные погрешности;
- 3) погрешности, связанные с процедурой визирования прибора на точки, определяющие угол.

Так как непосредственное визирование на точку, закрепленную в грунте знаком, бывает затруднено из-за неровностей местности и растительности, над знаком устанавливают визирные цели, марки, вехи, шпильки. Если требуется измерить угол с большой точностью, для минимизации погрешностей центрирования прибора и визирования используют комплект визирных целей (КВЦ), который состоит из визирных марок, подставок и штативов. Для центрирования теодолита и визирной марки над точкой применяют *оптический центрир*. Погрешность центрирования 9,5 – 1,0 мм. Вехи устанавливают, непосредственно совмещая заостренную часть с центром точки. Отвесность вех проверяют по вертикальной нити сетки трубы теодолита, наведение выполняют на основания вех. Шпильки устанавливают при измерении углов с короткими сторонами. Острые шпильки совмещают с центром знака, а их отвесность проверяют по вертикальной нити сетки трубы. Центрирование над вершинами углов следует выполнять более тщательно, если углы имеют короткие стороны и если значения углов близки к 180° .

Из инструментальных погрешностей на измерение углов наибольшее влияние оказывает наклон оси вращения трубы, коллимационная погрешность и погрешность места нуля (для вертикальных углов). При аккуратном выполнении поверок и их учете погрешность отсчета является основной погрешностью при измерении углов. Величина M_0 не влияет на горизонтальные углы и целиком входит в значение вертикального угла, измеренного при одном круге. При двух кругах ее значение, входящее в среднее с разными знаками, компенсируется.

Измерение угла полным приемом исключает возможность наличия грубых ошибок и сводит к минимуму влияние различных источников погрешностей: инструментальных, визирования, центрирования и др. Для повышения точности рекомендуется измерять угол двумя-тремя приемами. Существенно сокращаются ошибки центрирования и визирования при работе по трехштативной системе. Суть процесса состоит в том, что при измерениях используют сразу три штатива с подставками и визирными марками, расположенными по сторонам измеряемого угла. Теодолит после измерения угла перемещают на каждую последующую по ходу точку, устанавливая в подставку, где ранее была марка.

ТЕМА 8. ЛИНЕЙНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В результате измерений длин линий на местности или строительной площадке определяют расстояния между заданными точками. За единицу линейных измерений в Республике Беларусь принят метр, определяемый как расстояние, пройденное светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды. Это определение метра было принято на XVII Генеральной конференции мер и весов в декабре 1985 г. после утверждения единых эталонов времени, частоты и длины.

Длины линий в инженерной геодезии измеряют непосредственным или косвенным способами – каждому из них присущи свои приборы и методы измерений. Применяемые в настоящее время приборы для измерения длин линий можно условно разделить на следующие группы: механические, оптические и электронные.

8.1. Измерение длин линий механическими приборами

К механическим мерным приборам относят линейные меры различной длины: ленты, рулетки, проволоки длиномеры и т.п. Расстояние измеряют непосредственным способом – путем последовательной укладки мерного прибора в створе измеряемой линии.

Мерные приборы. Землемерные ленты типа ЛЗ (рис. 8.1) изготавливают из стальной полосы шириной до 25 мм, толщиной 0,4 – 0,5 мм и длиной 20, 24 или 50 м.

Наиболее распространены 20-метровые ленты. Концы ленты снабжены ручками. Напротив концевых штрихов имеются вырезы для фиксирования концов ленты втыкаемыми в землю шпильками. Шпилька – это металлический стержень с заостренным концом и кольцом-ручкой.

Метровые деления ленты оцифрованы, счет их ведется от заднего конца к переднему. Полуметры обозначены заклепками, а наименьшие дециметровые деления отмечены круглыми отверстиями диаметром 2 мм. Десятые доли дециметровых делений, при получении отсчета, определяют «на глаз». Для хранения ленту наматывают на специальное кольцо. К ленте прилагается комплект из шести (или одиннадцати) металлических шпилек. Для переноски шпильки надевают на проволоочное кольцо.

Рулетки выпускают со шкалами номинальной длины: 10, 20, 30, 50 и 100 м с миллиметровыми делениями, в которых используются ленты следующих видов:

- стальная лента с делениями, нанесенными методом травления;
- стальная крашенная лента;

- стальная крашенная лента с полиамидным покрытием;
- лента из нержавеющей стали с делениями, нанесенными методом травления;
- фибергласовая лента с капроновым кордом.

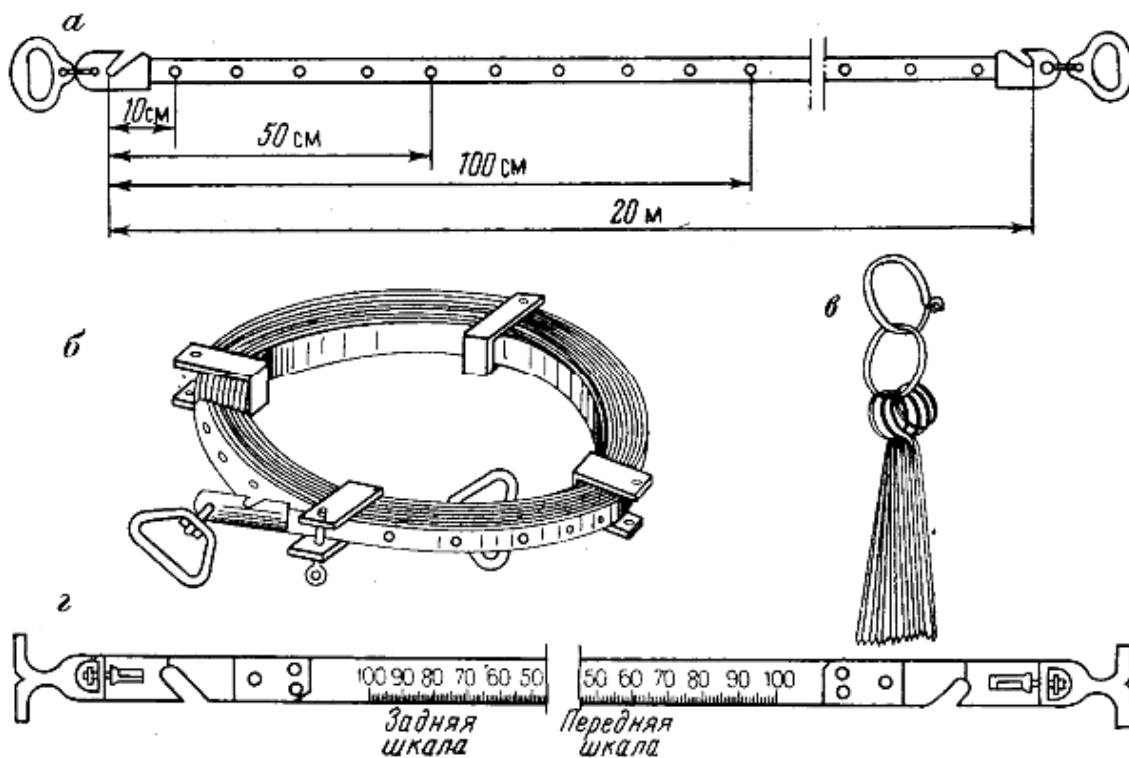


Рис. 8.1. Мерные ленты

Наиболее долговечными являются ленты, изготавливаемые из нержавеющей стали, и ленты, имеющие полиамидное покрытие. Полиамид – прозрачный пластик, надежно защищающий металлические ленты от воздействия влаги и трения. Рулетки с такими лентами не ржавеют, разметка на них не стирается.

Компарирование. До применения мерных приборов их компарируют. Компарированием называется сравнение длины мерного прибора с другим прибором, принятым за эталон или эталонным расстоянием, длина которого известна с более высокой точностью [9].

Для компарирования ленты ЛЗ на ровной поверхности (например, досчатой, каменной) с помощью выверенной образцовой ленты отмеряют отрезок номинальной длины (20 м) и укладывают на том же месте проверяемую рабочую ленту. Совместив нулевой штрих ленты с началом отрезка, закрепляют конец ленты в этом положении. Затем ленту растягивают и

линеечкой измеряют величину несовпадения конечного штриха ленты с концом отрезка, т. е. отличие Δl_k длины ленты от номинала. В последующем эту величину используют для вычисления *поправок за компарирование*. Ими исправляют результаты измерений лентой. Если Δl_k не превышает 1-2 мм, поправкой за компарирование пренебрегают.

Для компарирования ленты в полевых условиях на ровной местности закрепляют концы линии, называемой базисом. Базис измеряют более точным прибором (светодальномером, рулеткой), а затем компарируемой лентой. Поверяемая лента натягивается с силой 98 Н. Из сравнения результатов измерений получают поправку Δl_k . Измерения выполняют несколько раз и за окончательный результат принимают среднее.

Рулетки, предназначенные для высокоточных измерений, компарируют на стационарных компараторах, где по результатам проверки длины ленты при разных температурах выводят уравнение ее длины:

$$l = l_0 + \Delta l_k + \alpha l_0 (t - t_0), \quad (8.1)$$

где l – длина ленты при температуре t ; l_0 – номинальная длина; Δl_k – поправка к номинальной длине при температуре компарирования t_0 ; α – температурный коэффициент линейного расширения.

Для новых рулеток уравнение длины указывают в паспорте прибора.

Вешение линии. Перед измерением длины линии на ее концах устанавливают вехи. Если длина линии превышает 100 м или на каких-то ее участках не видны установленные вехи, то в их створе ставят дополнительные вехи (створом двух точек называют проходящую через них вертикальную плоскость). Вешение обычно ведут «на себя». Наблюдатель становится на провешиваемой линии у вехи A (рис. 8.2, *a*), а рабочий по его указаниям ставит веху 1 так, чтобы она закрыла собой веху B . Таким же образом последовательно устанавливают вехи $2, 3$ и т. д. Установка вех в обратном порядке, т. е. «от себя»,

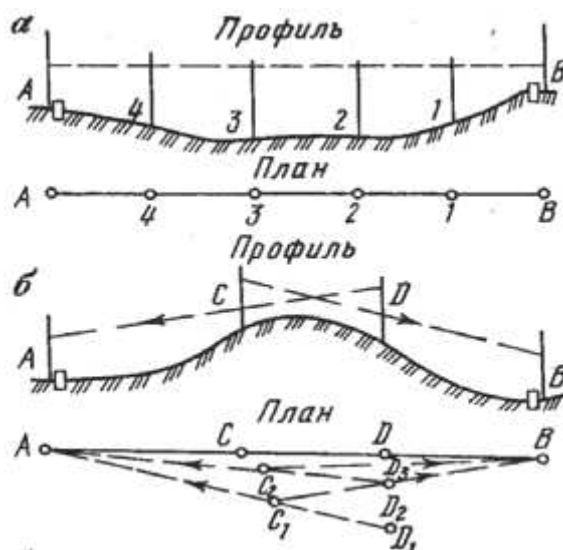


Рис. 8.2. Схемы вешения линий: *a* – способом «на себя»; *b* – через холм

является менее точной, т. к. ранее выставленные вехи закрывают видимость на последующие.

Если между конечными точками A и B нет взаимной видимости, то в этих точках устанавливают вехи, а вешение выполняется следующим образом (рис. 8.2, б). Вблизи от створа ставят веху в произвольной точке D_1 и, провешивая линию D_1A , устанавливают веху в створной точке C_1 . Затем провешивают линию C_1B , переставляя веху из точки D_1 в створную точку D_2 . Далее снова провешивают линию D_2A , перемещая веху из точки C_1 в точку C_2 . В таком порядке вехи перемещают до тех пор, пока они не займут следующего положения: веха D будет находиться в створе линии CB , а веха C – в створе линии DA . Это свидетельствует о том, что все вехи A , C , D и B выставлены в одной отвесной плоскости.

Измерение длин линий лентой. Ориентируясь по выставленным вехам, два мерщика откладывают ленту в створе линии, фиксируя концы ленты втыкаемыми в землю шпильками. По мере продвижения измерений задний мерщик вынимает из земли использованные шпильки и использует их для подсчета числа отложенных лент. Измеренное расстояние равно

$$D = l_0 n + r, \quad (8.2)$$

где l_0 – номинальная длина ленты (20 м), n – число отложенных целых лент и r – остаток (отсчет по последней ленте, меньший 20 м).

Длину измеряют дважды – в прямом и обратном направлениях. Расхождение не должно превышать 1/2000 (при неблагоприятных условиях – 1/1000). За окончательное значение принимают среднее.

Введение поправок. Измеренные расстояния исправляют поправками за компарирование, за температуру и за наклон.

Поправка за компарирование определяется по формуле

$$\Delta_k = n \Delta l_k (n + r/l), \quad (8.3)$$

где Δl_k – отличие длины ленты от 20 м; n – число уложенных лент.

При длине ленты больше номинальной – поправка положительная, при длине меньше номинальной – отрицательная. Поправку за компарирование вводят в измеренные расстояния, если $\Delta l_k > 2$ мм.

Поправка за температуру определяется по формуле

$$\Delta_t = \alpha D(t - t_0), \quad (8.4)$$

где α – термический коэффициент расширения (для стали $\alpha = 0,0000125$); t и t_0 – температура ленты во время измерений и при компарировании.

Поправку Δ_t учитывают, если $|t - t_0| > 10^\circ$.

Поправка за наклон вводится для определения горизонтального проложения d измеренного наклонного расстояния D

$$d = D \cos v, \quad (8.5)$$

где v – угол наклона.

Вместо вычисления по формуле (8.5) можно в измеренное расстояние D ввести поправку за наклон:

$$d = D + \Delta v,$$

где
$$\Delta v = d - D = D (\cos v - 1) = -2D \sin^2 \frac{v}{2}. \quad (8.6)$$

Поправка за наклон имеет знак минус. При измерениях лентой ЛЗ поправку учитывают, когда углы наклона превышают 2° .

Если линия состоит из участков с разным уклоном, то находят горизонтальные проложения участков и результаты суммируют.

Углы наклона, необходимые для приведения длин линий к горизонту, измеряют эклиметром или теодолитом.

Эклиметр имеет внутри коробки 5 (рис. 8.3, а) круг с градусными делениями на его ободе. Круг вращается на оси и под действием укрепленного на нем груза 3 занимает положение, при котором нулевой диаметр круга горизонтален. К коробке прикреплена визирная трубка с двумя диоптрами – глазным 1 и предметным 4.

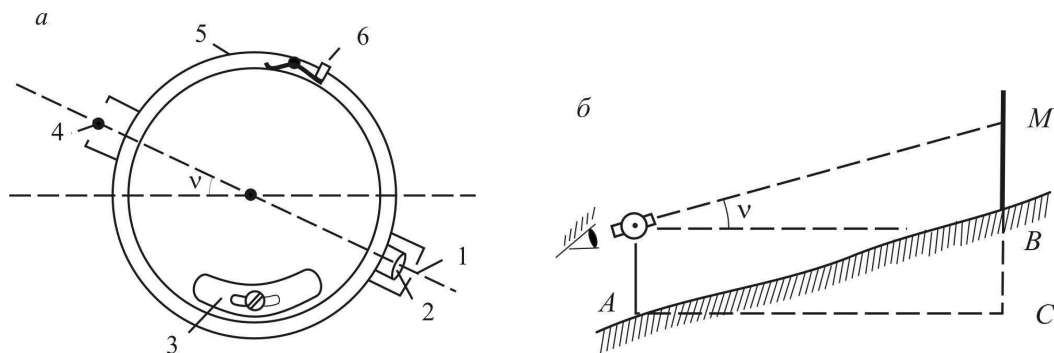


Рис. 8.3. Эклиметр: а – устройство; б – измерение угла наклона

Для измерения угла наклона v в точке B (рис. 8.3, б) ставят веху с меткой M на высоте глаза. Наблюдатель (в точке A), глядя в трубку 2 эклиметра, наводит ее на точку M и нажатием кнопки 6 освобождает круг. Когда нулевой диаметр круга примет горизонтальное положение, против нити предметного диоптра 4 берут отсчет угла наклона. Точность измерения угла эклиметром $15 - 30'$.

Поверку эклиметра выполняют измерением угла наклона одной и той же линии в прямом и обратном направлениях. Оба результата должны быть одинаковы. В противном случае надо переместить груз Z в такое положение, при котором отсчет будет равен среднему из прямого и обратного измерений.

Точность измерений лентой в разных условиях различна и зависит от многих причин – неточное укладывание ленты в створ, ее непрямолинейность, изменения температуры ленты, отклонения угла наклона ленты от измеренного эклиметром, неодинаковое натяжение ленты, ошибки фиксирования концов ленты, зависящие от характера грунта и др.

Приблизительно точность измерений лентой ЛЗ считают равной 1:2000. При благоприятных условиях она в 1,5 – 2 раза выше, а при неблагоприятных – около 1:1000.

Измерение расстояний рулетками. Измерения рулеткой, выполняемые для составления плана местности, аналогичны измерениям лентой ЛЗ. Для измерений с более высокой точностью, необходимой, например, в разбивочных работах, выполняемых при строительстве сооружений, измеряемую линию расчищают, выравнивают и разбивают на отрезки по длине рулетки, забивая в створе линии до уровня земли колья и отмечая створ втыкаемыми в них иглами или ножами. При неровной поверхности на нее укладывают доски или даже делают мостки. Для измерения пролета между соседними иглами (ножами) рулетку укладывают вдоль пролета и натягивают с той же силой (50 или 100 Н), что и при компарировании, используя для этого динамометр. Отсчеты по рулетке берут одновременно по команде против двух игл (лезвий ножей). Длину пролета d_i определяют по формуле

$$d_i = P - 3, \quad (8.7)$$

где P и 3 – передний (большой) и задний отсчеты по шкале рулетки.

Полученный результат исправляют поправками за компарирование и температуру, используя уравнение длины рулетки (8.1).

Если линия имеет наклон, необходимо учесть поправку

$$\Delta_h = -\frac{h^2}{2d_i} - \frac{h^4}{8d_i^3}, \quad (8.8)$$

где h – превышение между концами пролета, измеряемое нивелиром.

Длина линии определится как сумма длин пролетов. Относительные ошибки расстояний при такой методике измерений 1:5000 – 1:10000.

8.2. Определение недоступных расстояний

Если препятствие (река, обрыв, здание) делает расстояние недоступным для измерения лентой, то его измеряют косвенным методом.

Так, для определения недоступного расстояния d измеряют лентой длину базиса b (рис. 8.4, а, б) и углы α и β . Из $\triangle ABC$ находят

$$d = b \sin \alpha / \sin (\alpha + \beta), \quad (8.9)$$

где учтено, что $\sin (\alpha + \beta) = \sin (180^\circ - \alpha - \beta) = \sin \gamma$.

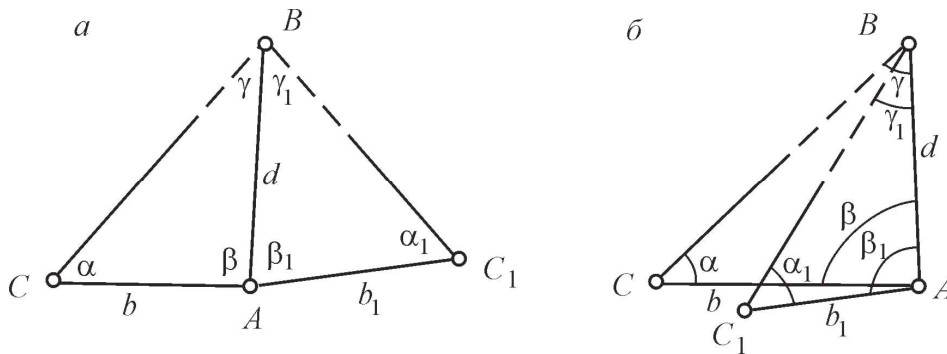


Рис. 8.4. Определение недоступного расстояния

Для контроля расстояние d определяют еще раз из треугольника $\triangle ABC_1$ и при отсутствии недопустимых расхождений вычисляют среднее.

8.3. Оптические дальномеры. Нитяной дальномер

Принципы работы оптических дальномеров. Оптические дальномеры или дальномеры геометрического типа позволяют определять расстояния косвенным методом.

В основу определения расстояний оптическими дальномерами положено решение вытянутого равнобедренного (прямоугольного) треугольника, имеющего одну короткую сторону (рис. 8.5). Острый угол ε такого треугольника называется параллактическим, а противолежащая сторона – базой.

Расстояние D определяется решением параллактического треугольника по формуле

$$D = \frac{1}{2} b \operatorname{ctg} \frac{\varepsilon}{2}. \quad (8.10)$$

Одну из величин (b или ε) принимают постоянной, другую (переменную) измеряют. В зависимости от этого оптические дальномеры делят

на две группы: дальномеры с постоянным параллактическим углом и переменной базой и дальномеры с переменным параллактическим углом и постоянной базой. Конструктивно оптические дальномеры могут быть выполнены в виде насадок на зрительную трубу или самостоятельного прибора, встроенного узла в геодезический прибор или в виде одного из элементов зрительной трубы. В настоящее время из оптических дальномеров в основном используется нитяной дальномер.

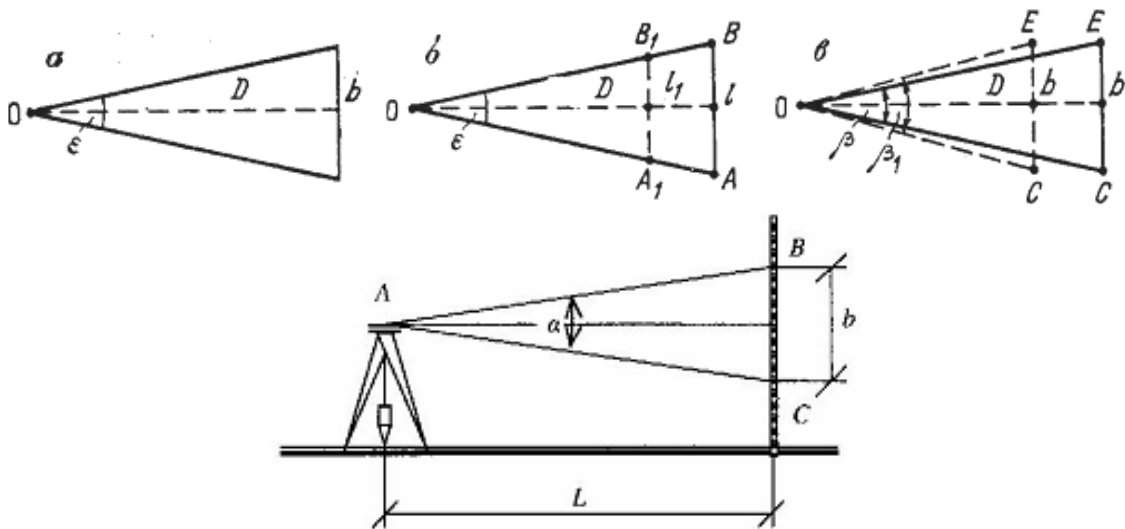


Рис. 8.5. Принцип измерения расстояния оптическими дальномерами

Теория нитяного дальномера. Зрительные трубы многих геодезических приборов снабжены нитяным дальномером. Сетка нитей зрительной трубы, кроме основных штрихов (вертикальных и горизонтальных), имеет дальномерные штрихи a и b (рис. 8.6, a). Расстояние D от оси вращения прибора MM (рис. 8.6, b) до рейки AB равно

$$D = L + f + \delta, \quad (8.11)$$

где L – расстояние от фокуса объектива до рейки; f – фокусное расстояние; δ – расстояние между объективом и осью вращения прибора.

Лучи, идущие через дальномерные штрихи сетки a и b параллельно оптической оси, преломляются объективом, проходят через его фокус F и проецируют изображения дальномерных штрихов на точки A и B , так что дальномерный отсчет по рейке равен n . Обозначив расстояние между дальномерными штрихами p , из подобных треугольников ABF и $a'b'F$ находим $L = n f / p$. Обозначив $f/p = K$ и $f + \delta = c$, получаем

$$D = K n + c, \quad (8.12)$$

где K – коэффициент дальномера; c – постоянная дальномера.

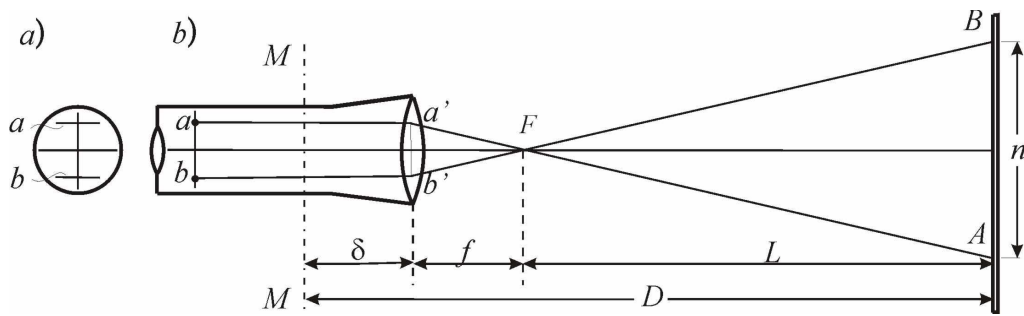


Рис. 8.6. Нитяной дальномер: *a* – сетка нитей; *b* – схема определения расстояния

При изготовлении прибора *f* и *p* подбирают такими, чтобы $K = 100$, а постоянная *c* была близкой к нулю. Тогда $D = 100 n$.

Точность измерения расстояний нитяным дальномером $\approx 1/300$.

Определение горизонтального проложения линии, измеренной нитяным дальномером. При измерении наклонной линии отсчет по рейке это отрезок $n = AB$ (рис. 8.7). Если рейку наклонить на угол ν , то отсчет будет равен $n_0 = A_0B_0 = n \cos \nu$ и наклонное расстояние

$$D = Kn_0 + c = Kn \cos \nu + c.$$

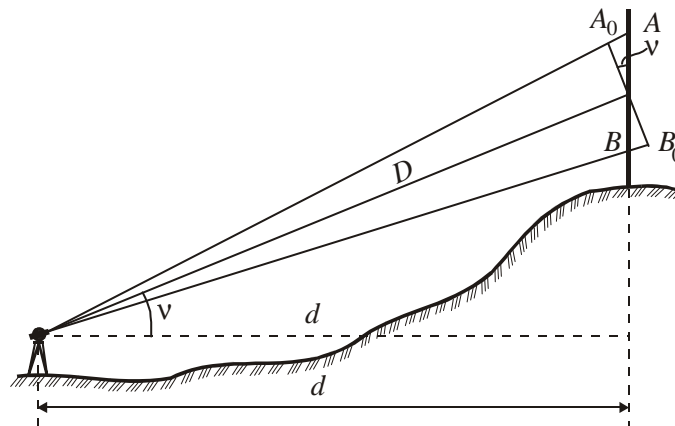


Рис. 8.7. Измерение нитяным дальномером наклонного расстояния

Умножив наклонное расстояние D на $\cos \nu$, получим горизонтальное расстояние $d = Kn \cos^2 \nu + c \cos \nu$.

Прибавив и отняв $c \cdot \cos^2 \nu$, после преобразований получим

$$d = (Kn + c) \cos 2\nu + 2c \cos \nu \sin 2(\nu/2).$$

Вторым слагаемым по его малости можно пренебречь. Тогда

$$d = (Kn + c) \cos 2\nu = D \cos 2\nu. \quad (8.13)$$

Для определения d пользуются микрокалькуляторами или составленными с использованием этой формулы «Тахеометрическими таблицами».

8.4. Светодальномеры, электронные тахеометры

Светодальномер – прибор, измеряющий расстояние по времени его прохождения световым сигналом [18].

В комплект светодальномера входят приемопередатчик и отражатель. Приемопередатчик 1 (рис. 8.8) устанавливают на штативе на одном конце измеряемой линии, а отражатель 2 на специальной вешке или тоже на штативе (на другом).

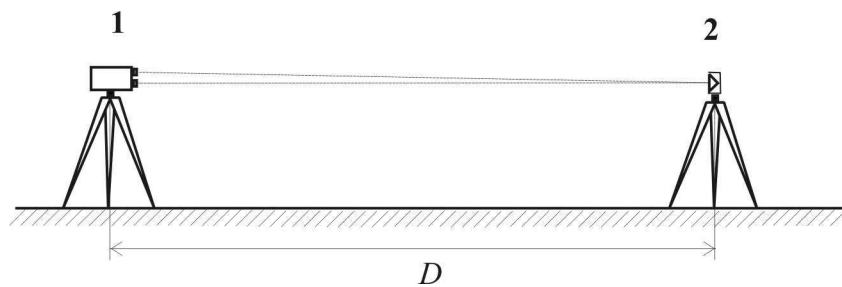


Рис. 8.8. Измерение расстояния светодальномером

Приемопередатчик излучает световой сигнал, принимает его после возвращения от отражателя, измеряет время τ , прошедшее от излучения до приема

$$D = v \cdot \tau / 2, \quad (8.14)$$

где τ – время прохождения сигнала на расстоянии в $2D$; v – скорость распространения электромагнитных волн в воздушной среде вдоль измеряемой линии; $v = v_0/n$, где $v_0 \approx 299792458$ м/с – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме; n – показатель преломления воздушной среды, зависящий от метеорологических условий.

Определение времени прохождения электромагнитными волнами измеряемого расстояния производится импульсным и фазовым методами (или их комбинацией). Исходя из этого светодальномеры подразделяют на импульсные и фазовые.

В *импульсных* светодальномерах измеряется время прохождения светового сигнала от приемопередатчика до отражателя и обратно. Счет времени ведется посредством счета импульсов генератора с момента запуска сигнала на дистанцию до момента приема отраженного сигнала. Величина D вычисляется по формуле

$$D = v\tau/2 = vN/2f, \quad (8.15)$$

где N – число импульсов; f – частота следования импульсов, Гц.

В *фазовых* светодальномерах вместо индикатора времени применяется индикатор разности фаз. Существует два типа фазовых светодальномеров: с плавно изменяющейся и фиксированной частотой.

В геодезической практике наиболее распространение получили фазовые дальномеры с фиксированной частотой, работа которых основана на определении фазового сдвига частоты, модулирующей световой поток, проходящий расстояние от приемопередатчика до отражателя и обратно. В двойном расстоянии от приемопередатчика и обратно укладывается целое число волн и дробная часть:

$$D = \frac{1}{2} \lambda \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = \frac{1}{2} N\lambda + \frac{1}{2} \Delta N\lambda, \quad (8.16)$$

где $\lambda = v/f$ – среднее значение длины волны модулирующей частоты для реальных атмосферных условий; N – число полных фазовых циклов (число полных длин волн); $\Delta\varphi/2\pi$ – дробная часть фазового цикла (дробная часть длины волны), $\Delta N = \Delta\varphi/2\pi$, причем $0^\circ < \Delta\varphi < 360^\circ$.

С внедрением полупроводниковых лазерных источников излучения и цифровых методов измерения разности фаз появились *импульсно-фазовые* светодальномеры, в основе которых лежит фазовый метод измерения временного интервала и импульсный метод излучения.

Измеренное расстояние исправляют поправками за атмосферное давление, температуру и влажность воздуха, влияющими на скорость света. Для получения горизонтального проложения вводят поправку за наклон.

Конструктивно любой приемопередатчик представляет собой отдельный прибор, насадку на теодолит или блок, входящий в состав электронного тахеометра. Он состоит из блока питания (штатного аккумулятора), источника лазерного излучения, электронного блока управления параметрами светового потока, оптической системы формирования узконаправленного светового пучка, оптической системы приема отраженного светового сигнала и электронного блока совместной обработки (отправленных на дистанцию и принятых световых сигналов) по определению расстояния.

По их назначению принято различать светодальномеры для построения государственных геодезических сетей, светодальномеры для прикладной (инженерной) геодезии и светодальномеры для топографических съемок.

Точность топографических светодальномеров 2 – 3 см, а применяемых в прикладной геодезии 2 – 3 мм.

Отражатели бывают призмные и пленочные. Основным элементом призмного отражателя (рис. 8.9 б) является стеклянная трипель-призма отражающая световые лучи в тех направлениях, откуда они пришли. Для увеличения дальности измерений изготавливают многопризмные отражатели.

Пленочный отражатель представляет собой отражающую свет пластиковую пленку размером 1×1 см и больше, на которую нанесены штрихи (например, вертикальный и горизонтальный). Дальность измерений с пленочными отражателями меньше, чем с призмными. Но зато пленочный отражатель можно закрепить там, где установить призмный отражатель невозможно, например – приклеить в нужном месте на сооружение. Кроме того, пленочные отражатели гораздо дешевле призмных. При выполнении угловых измерений центр штрихов на отражателе служит визирной целью.

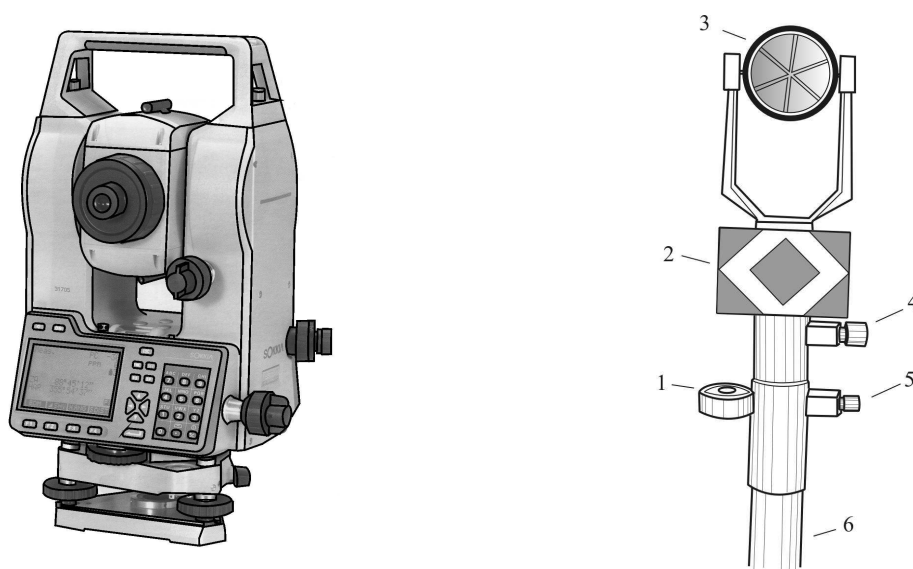


Рис. 8.9. Электронный тахеометр: а – основной прибор;
 б – однопризмный отражатель: 1 – уровень; 2 – визирная марка;
 3 – призма; 4, 5 – закрепительные винты; 6 – штанга

Лазерные рулетки различных модификаций представляют собой малогабаритные лазерные фазовые светодальномеры, использующие диффузное отражение сигнала от предметов и не требующие отражателя. Прибор используют без штатива, с руки. Световой луч наводят на нужные объекты и на шкале читают расстояния. При небольших габаритах и массе (до 500 г) лазерные рулетки обеспечивают довольно высокую точность изме-

рений (~ 3 мм) расстояний в диапазоне от 0,3...200 м. В различных приборах процессор обладает внутренней памятью на 20 – 2000 измерений, а также некоторыми встроенными функциями. Основные функции прибора:

- функция по вычислению площади прямоугольного помещения, его объема, если измерены длина, ширина и высота;
- функция по вычислению высоты вертикальной конструкции, если измерены горизонтальное расстояние (катет) и наклонное расстояние (гипотенуза) от прибора до точек объекта.

Лазерные рулетки можно подключать к компьютеру и, используя специальные программы, выполнять обработку данных.

Электронные тахеометры. Электронным тахеометром (рис. 8.9, а) называется прибор, объединяющий в себе светодальномер, электронный теодолит и микро-ЭВМ. Светодальномер прибора измеряет расстояние до отражателя. Датчики горизонтального и вертикального кругов электронного теодолита выдают отсчеты по кругам. Отсчеты расстояния и углов передаются на индикацию и регистрацию. Микро-ЭВМ обеспечивает возможность решения целого ряда стандартных геодезических задач, для чего прибор снабжен набором необходимых прикладных программ. Полученная в результате измерений и вычислений информация высвечивается на цифровом табло, а также регистрируется во внутренней памяти прибора и на флэш-картах для последующего ввода в компьютер и дальнейшей обработки.

Электронный тахеометр может иметь одну или две панели управления, расположенные с обеих сторон прибора. На панели управления расположены дисплей и клавиатура для управления процессом измерений и ввода информации вручную. Ввод информации и управление возможны и с дистанционного пульта управления (контроллера). Тахеометр может иметь световой указатель створа, облегчающий установку вехи с отражателем на линию, по которой направлена труба прибора.

Программное обеспечение электронных тахеометров поддерживает решение достаточно широкого круга задач. Обычно бывает предусмотрен ввод и сохранение данных о станции: ее координат, номера точки, высоты прибора, имени оператора, даты, времени, сведений о погоде (ветре, температуре, давлении). По результатам измерений выполняется вычисление горизонтальных и вертикальных углов, дирекционных углов линий, горизонтальных проложений, превышений, высот точек, где установлен отражатель, приращений координат, плоских и пространственных координат

наблюдаемых точек. Предусмотрена возможность вычисления координат по результатам засечек, вычисления расстояния до недоступной для установки отражателя точки и координат недоступной точки, определения высоты недоступного объекта. Для обеспечения разбивочных работ служат программы вычисления угла и расстояния для выноса точки с заданными координатами. При решении задач учитывается рефракция световых лучей в атмосфере.

В настоящее время на рынке имеется широкий выбор электронных тахеометров, выпускаемых разными фирмами, в числе которых *Уральский оптико-механический завод* (Россия), *Sokkia* (Япония), *Trimble* (США), *Leica* (Швейцария) и др. Характеристики приборов разных марок различаются. Средние квадратические погрешности измерения углов тахеометров лежат в пределах от 1" до 7". Максимальные дальности измерения расстояний на однопризменный отражатель различаются от 1600 до 5000 м. При этом точность измерений в среднем характеризуется ошибкой $2 \text{ мм} + 2 \times 10^{-6} D$, где D – измеряемое расстояние. Многие из электронных тахеометров позволяют измерять расстояния без отражателя. Дальность таких измерений меняется в разных приборах в пределах 70 – 350 м.

Использование электронных тахеометров значительно повышает производительность труда, упрощает и сокращает время на обработку результатов измерений, исключает такие ошибки исполнителя, которые имеют место при визуальном снятии отсчетов, при записи результатов измерений в журналы, в вычислениях. При работе с электронным тахеометром отпадает необходимость иметь калькулятор для выполнения полевых вычислений.

ТЕМА 9. НИВЕЛИРОВАНИЕ

9.1. Сущность и методы нивелирования

Нивелированием называется определение высот точек местности относительно принятой исходной поверхности или же определение их разностей – *превышений* одних точек над другими. Путем нивелирования значения высот передают от исходных точек с известными высотами на точки, высоты которых надо определить.

Нивелирование представляет необходимую составляющую топографических съемок, геодезических изысканий для строительства различных зданий и сооружений, а также технологического сопровождения строительства практически всех видов сооружений.

В зависимости от применяемых приборов и методов различают следующие виды нивелирования: геометрическое, тригонометрическое, гидростатическое, барометрическое, механическое, радиолокационное (аэро-нивелирование), спутниковое, сканерное [5].

Геометрическое нивелирование – метод определения превышений путем взятия отсчетов по вертикальным рейкам при горизонтальном луче визирования. Это – основной метод нивелирования. Методом геометрического нивелирования создана государственная нивелирная сеть, создаются инженерно-геодезические высотные сети различного назначения.

Тригонометрическое нивелирование – метод определения превышения из тригонометрических соотношений в прямоугольном треугольнике. Измеряется вертикальный угол и расстояние, а вычисленное значение противолежащего катета есть искомое превышение.

Гидростатическое нивелирование – метод, основанный на свойствах жидкостей, свободная поверхность которых, всегда устанавливается на одинаковом уровне в сообщающихся сосудах.

При *барометрическом нивелировании* барометром измеряют атмосферное давление в нескольких точках и по разности давлений вычисляют превышения.

Радиолокационное нивелирование производят с самолета при постоянной высоте полета. Измеряют вертикальные расстояния до земной поверхности, а по их разностям – превышения с точностью до 1 м.

Механическое нивелирование, называемое еще автоматическим, – метод определения разностей высот точек местности посредством профилографов, устанавливаемых на рамах велосипедов, автомобилях или специ-

альных тележках, дрезинах, автоматически записывающих профиль местности. Действие профилографов основывается на механическом маятнике или на использовании горизонтального положения поверхности жидкости в сосуде.

Спутниковое нивелирование заключается в определении высоты точек, над которыми устанавливают наземные GPS-приемники. По разности высот вычисляют превышения между точками. Определение превышений и высот точек с помощью спутниковых измерений осуществляется аппаратурой ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США). Следует указать, что автономное определение высот точек выполняется с точностью нескольких метров, а определение превышений между точками – с точностью 10 – 15 мм.

Сканерное нивелирование – это составляющая сканерной съемки местности с опорной точки на земле или, например, с самолета. Сканирование местности включает излучение светодальномером сканера направленных прерывистых электромагнитных сигналов и прием отраженных сигналов, компьютерную обработку полученных координат сканированных точек (облако точек) и создание цифровой модели местности, формирование ее картографического отображения, получение числовых характеристик рельефа и объектов (высот, превышений, профилей и др.). Точность метода зависит от дальности объекта съемки и условий съемки (с самолета, с наземной опоры), характеризуется дециметрами (съемка с самолета) или несколькими миллиметрами погрешностей высот (съемка с наземной опоры при расстояниях до точек не более 300 м).

Подробнее рассмотрим методы геометрического и тригонометрического нивелирования, как наиболее часто применяющиеся в настоящее время на производстве.

9.2. Геометрическое нивелирование

Геометрическое нивелирование выполняют, используя нивелир и нивелирные рейки. Нивелир – прибор, в котором визирный луч приводится в горизонтальное положение. Отсчеты берут по шкалам устанавливаемых вертикально нивелирных реек. Оцифровка шкал на рейках возрастает от пятки рейки вверх. Если на пятке рейки расположен ноль шкалы, то отсчет по рейке равен расстоянию от пятки до луча визирования.

Геометрическое нивелирование выполняют двумя способами – «из середины» и «вперед».

Нивелирование «из середины» – основной способ. Для измерения превышения точки B над точкой A (рис. 9.1, a) нивелир устанавливают в середине между точками (как правило, на равных расстояниях) и приводят его визирную ось в горизонтальное положение. На точках A и B устанавливают нивелирные рейки. Берут отсчет a по задней рейке и отсчет b по передней рейке. Превышение вычисляют по формуле

$$h = a - b.$$

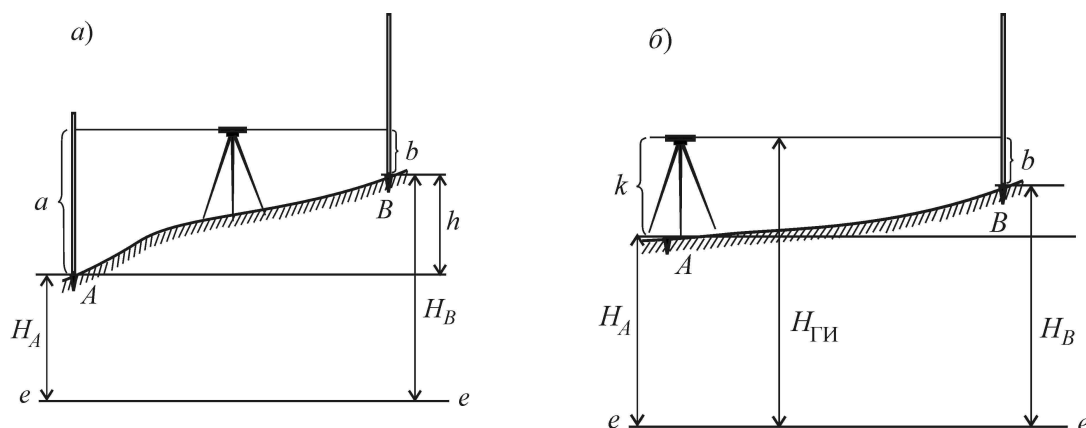


Рис. 9.1. Нивелирование: a – «из середины»; b – «вперед»;
(ee – исходная уровенная поверхность)

Обычно для контроля превышение измеряют дважды – по черным и красным сторонам реек. За окончательный результат принимают среднее.

Если известна высота H_A точки A , то высоту H_B точки B вычисляют по формуле

$$H_B = H_A + h_{AB}. \quad (9.1)$$

При нивелировании «вперед» (рис. 9.1, b) нивелир устанавливают над точкой A и измеряют (обычно с помощью рейки) высоту прибора i . В точке B , высоту которой требуется определить, устанавливают рейку. Приведя визирную ось нивелира в горизонтальное положение, берут отсчет b по черной стороне рейки. Вычислив превышение

$$h = i - b,$$

по формуле (9.1) находят высоту точки B .

На строительной площадке, где на земляных работах, укладке бетона или асфальта и пр. требуется с одной стоянки нивелира определить высоты многих точек, сначала вычисляют общую для всех точек высоту горизонта инструмента $H_{ГИ}$ – высоту визирной оси нивелира над уровенной поверхностью:

$$H_{ГИ} = H_A + i,$$

а затем – высоты определяемых точек

$$H_1 = H_{\text{ГИ}} - b_1, \quad H_2 = H_{\text{ГИ}} - b_2, \quad \dots,$$

где индексы 1, 2, ... – номера определяемых точек.

Если точки A и B , расположены так, что измерить между ними превышение с одной установки нивелира невозможно, превышение измеряют по частям, т. е. прокладывают *нивелирный ход* (рис. 9.2).

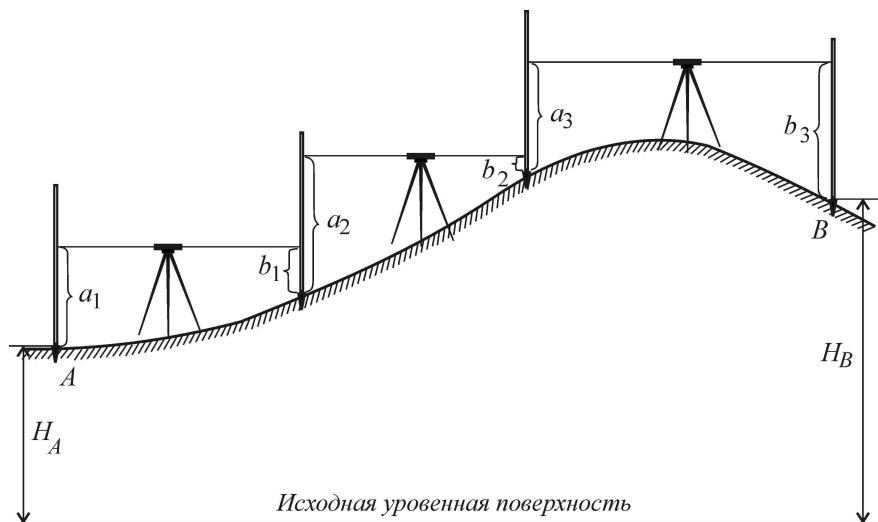


Рис. 9.2. Нивелирный ход

Превышения вычисляют по формулам (см. рис. 9.2):

$$h_1 = a_1 - b_1;$$

$$h_2 = a_2 - b_2;$$

$$h_3 = a_3 - b_3.$$

Превышение между конечными точками хода A и B равно сумме вычисленных превышений:

$$h_{AB} = h_1 + h_2 + h_3,$$

а высоту точки B определяют по формуле (9.1).

9.3. Нивелиры

Отечественная и зарубежная промышленность выпускает приборы различной конструкции и точности.

По устройству различают следующие типы нивелиров.

Нивелиры с уровнем при трубе снабжены точным цилиндрическим уровнем, приводимым для измерений вместе со зрительной трубой в гори-

зонтальное положение вручную. Нивелирами с уровнем при трубе являются нивелиры российского производства Н-3, Н-05, 3Н5Л и др.

Нивелиры с компенсатором углов наклона отличаются наличием устройства, автоматически приводящего визирную ось зрительной трубы в горизонтальное положение. Компенсатор работает в пределах 12 – 15', поэтому прибор предварительно устанавливают в рабочее положение по круглому уровню. Такими нивелирами являются Н-3К, 3Н2КЛ и др.

Нивелиры с оптическим микрометром (например, нивелир Н-05) имеют перед объективом стеклянную пластину, повороты которой вокруг ее горизонтальной оси смещают лучи света параллельно самим себе. Это позволяет наводить визирную ось точно на штрих рейки. Величина смещения измеряется оптическим микрометром, чем достигается высокая точность отсчета по рейке.

Лазерные нивелиры излучают видимый пучок света. Отсчет берут по световому пятну на рейке.

Цифровые нивелиры автоматически формируют отсчет по рейке, шкала которой представляет собой штриховой код. Они снабжены компенсатором углов наклона. Отсчеты по рейкам регистрируются на магнитном носителе. Примером такого прибора является нивелир *SDL30M* (Япония).

По точности нивелиры делят на *высокоточные, точные и технические* в зависимости от величины приборной средней квадратической погрешности m_h измерения превышения на 1 км двойного хода (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Типы нивелиров	Точность прибора $m_h \leq$	Примеры нивелиров
Высокоточные	0,5 мм	Н-05 (Россия), PL1 (Япония)
Точные	3 мм	3Н2КЛ, Н-3, Н-3К (Россия), С300 (Япония), DSZ3(Китай)
Технические	5 мм	3Н5Л (Россия), АТ20D (Китай)

9.4. Нивелир с уровнем при трубе

Нивелиром с уровнем при трубе является, например, нивелир Н-3. Его устройство показано на рис. 9.3.

Для выполнения измерений нивелир устанавливают на штативе и подъемными винтами 7 приводят в нуль-пункт пузырек круглого уровня 5. Пользуясь закрепительным 3 и наводящим 4 винтами, наводят зрительную трубу на рейку. Вращением диоптрийного кольца окуляра 10 фокусируют трубу «по глазу» и вращением головки фокусирующего винта 2 – «по

предмету». В поле зрения трубы будут видны штрихи сетки нитей, изображение нивелирной рейки и в отдельном окошке – изображения двух половинок цилиндрического уровня (рис. 9.4).

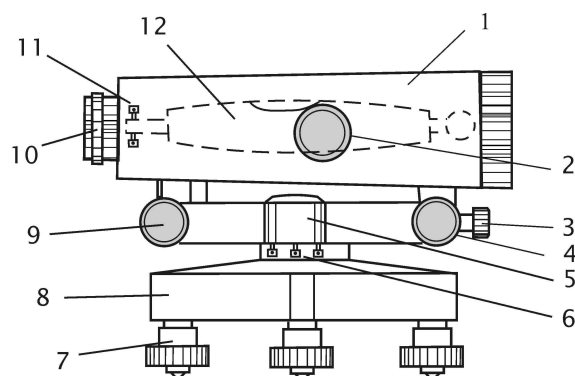


Рис. 9.3. Устройство нивелира Н-3: 1 – зрительная труба; 2 – фокусирующий винт зрительной трубы; 3, 4 – закрепительный и наводящий винты; 5 – круглый уровень; 6 – исправительные винты круглого уровня; 7 – подъемные винты; 8 – подставка; 9 – элевационный винт; 10 – окуляр с диоптрийным кольцом для фокусировки трубы по глазу; 11 – исправительные винты цилиндрического уровня; 12 – цилиндрический уровень

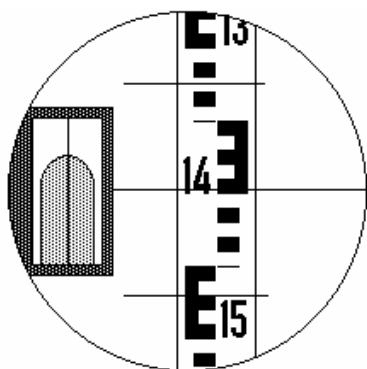


Рис. 9.4. Поле зрения зрительной трубы нивелира: отсчет по рейке равен 1449 мм

Вращая элевационный винт 9 (см. рис. 9.3), изменяющий наклон трубы 1 и цилиндрического уровня 12, приводят ось уровня в горизонтальное положение. Ось уровня горизонтальна, если его пузырек находится в нуль-пункте, на что указывает совмещение концов изображений половинок уровня в поле зрения трубы (см. рис. 9.4). Отсчет берут по среднему штриху сетки нитей.

9.5. Поверки нивелира с уровнем при трубе

Необходимая точность нивелирования может быть достигнута только в том случае, если обеспечено верное взаиморасположение основных осей нивелира. Для контроля предъявляемых к прибору требований в начале и периодически в ходе работ выполняют проверки нивелира. Основными проверками являются следующие [4].

Проверка круглого уровня. *Ось круглого уровня должна быть параллельна оси вращения прибора.*

Подъемными винтами нивелира приводят пузырек круглого уровня в нуль-пункт. Поворачивают нивелир на 180° вокруг оси его вращения ii (рис. 9.5). Если после поворота пузырек остался в нуль-пункте, проверяемое условие выполнено – ось круглого уровня ee параллельна оси вращения прибора ii .

Если пузырек ушел из нуль-пункта, исправительными винтами 2 изменяют наклон уровня так, чтобы пузырек сместился в сторону нуль-пункта на половину отклонения. Для поворота исправительных винтов пользуются шпилькой.

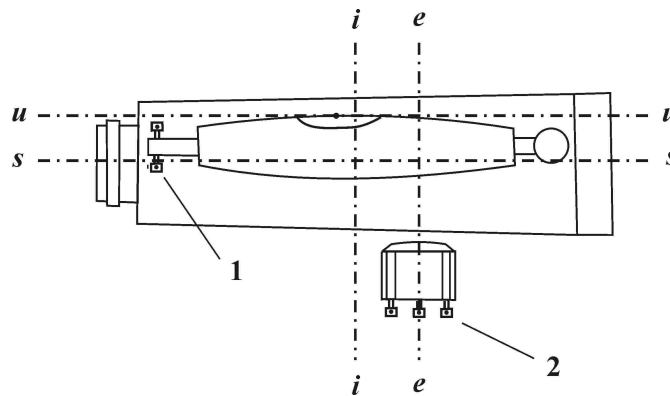


Рис. 9.5. Оси и исправительные винты нивелира:
 ss – визирная ось зрительной трубы; ii – ось вращения прибора;
 iii – ось цилиндрического уровня; ee – ось круглого уровня;
 1 – исправительные винты цилиндрического уровня;
 2 – исправительные винты круглого уровня

Проверка цилиндрического уровня. *Ось цилиндрического уровня должна быть параллельна визирной оси зрительной трубы.*

У высокоточных и точных нивелиров проекция на отвесную плоскость угла между осью цилиндрического уровня и визирной осью не должна превышать $10''$. Это означает, что при расстоянии до рейки $d = 100$ м допустима ошибка в отсчете по рейке из-за непараллельности оси уровня и визирной оси, не превышающая $\frac{10''}{\rho}d = 5$ мм, где $\rho = 206\,265''$ – число секунд в одном радиане.

Проверка выполняется путем измерения одного и того же превышения дважды – способом «из середины» и с неравными расстояниями до реек.

На расстоянии 75 – 100 м друг от друга закрепляют две точки, на которые устанавливают рейки (рис. 9.6). В середине, на равных расстояниях

от реек устанавливают нивелир и, приводя пузырек цилиндрического уровня в нуль-пункт, берут отсчеты a и b по рейкам и вычисляют превышение $h = a - b$.

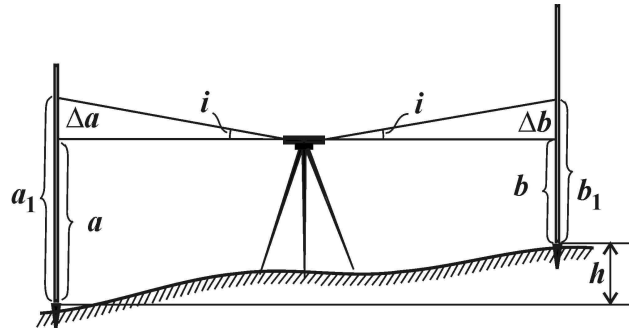


Рис. 9.6. Поверка цилиндрического уровня. Способ «из середины»

Если визирная ось трубы не параллельна оси уровня и потому наклонена на угол i , то вместо верных отсчетов a и b будут прочтены отсчеты a_1 и b_1 . Вследствие равенства расстояний до реек ошибки в обоих отсчетах будут одинаковыми, $\Delta a = \Delta b$. Вычисленное при этом превышение будет равно

$$h = a_1 - b_1 = (a + \Delta a) - (b + \Delta b) = a - b.$$

Следовательно, несмотря на ошибки отсчетов, вызванные непараллельностью оси уровня и визирной оси трубы, превышение, вычисленное по измерениям способом «из середины», – верное.

Нивелир переносят и устанавливают на расстоянии 2 – 3 м от одной из реек (рис. 9.7). Берут отсчет b_2 по ближней рейке. Ввиду малости расстояния до рейки погрешность в отсчете b_2 , вызванная наклоном луча визирования, мала, поэтому отсчет b_2 считают безошибочным.

Вычисляют отсчет, который должен быть на дальней рейке, если луч визирования горизонтален: $a_0 = b_2 + h$.

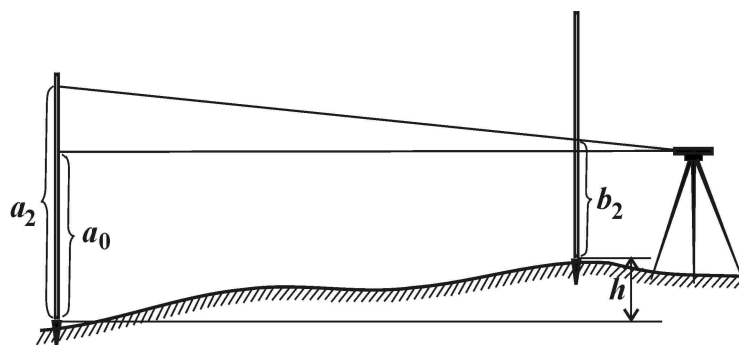


Рис. 9.7. Поверка цилиндрического уровня. Способ «вперед»

Наводят нивелир на дальнюю рейку и берут фактический отсчет a_2 . Сравнивают вычисленный и фактический отсчеты.

Если вычисленный a_0 и фактический a_2 отсчеты различаются меньше, чем на 5 мм, то считают, что ось цилиндрического уровня uu (рис. 9.5) параллельна визирной оси ss .

Если вычисленный и фактический отсчеты различаются больше, чем на 5 мм, то положение цилиндрического уровня необходимо исправить.

Для этого элевационным винтом наводят средний штрих сетки нитей на отсчет a_0 по дальней рейке. При этом пузырек цилиндрического уровня уйдет из нуля-пункта. Вертикальными исправительными винтами приводят пузырек цилиндрического уровня в нуль-пункт, совмещая изображения концов половинок пузырька в поле зрения трубы.

У нивелиров с компенсатором углов наклона цилиндрического уровня нет, и при выполнении поверки добиваются выполнения следующего условия.

Визирная линия зрительной трубы должна быть горизонтальна в пределах работы компенсатора.

Поверка выполняется в том же порядке, как и поверка цилиндрического уровня. Но при этом различие вычисленного a_0 и фактического a_2 отсчетов указывает на негоризонтальность визирной линии зрительной трубы.

Для исправления снимают колпачок, закрывающий исправительные винты сетки нитей зрительной трубы, и с помощью вертикальных исправительных винтов наводят среднюю нить сетки нитей на отсчет по дальней рейке, равный вычисленному отсчету a_0 .

9.6. Нивелирные рейки

Для высокоточного нивелирования служат цельные трехметровые инварные рейки. На рейке крепится круглый уровень, используемый для установки рейки в вертикальное положение.

Для точного и технического нивелирования служат трехметровые цельные или складные деревянные рейки. На двух сторонах рейки нанесены шкалы с сантиметровыми делениями в виде шашек, на одной стороне – черных, на другой – красных. Установка таких реек в вертикальное положение выполняется по круглому уровню или на глаз.

При измерениях цифровыми нивелирами пользуются специальными рейками со шкалой в виде штрих-кода.

Поверки реек состоят в определении с помощью контрольной линейки длины метровых и дециметровых интервалов, определении разности нулей пары реек, проверке установки круглого уровня на рейке.

9.7. Влияние кривизны Земли и рефракции на результаты нивелирования

На рисунке 9.8 показаны: точка 1 – отсчет по рейке B в случае, если луч света распространяется прямолинейно; точка 2 – фактический отсчет по рейке; точка 3 – место пересечения рейки с линией параллельной горизонтальной поверхности.

Из треугольника $\Delta O1I$ (рис. 9.8, б) имеем $(R + \Delta h)^2 = d^2$, где R – радиус Земли и d – расстояние до рейки. Следовательно, кривизна Земли изменяет отсчет по рейке на величину $\Delta h \approx d^2 / (2R)$.

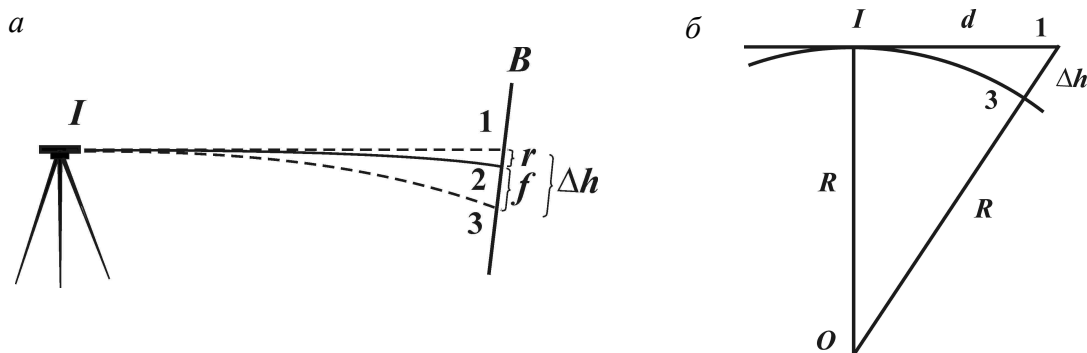


Рис. 9.8. К влиянию кривизны Земли и рефракции: а – схема влияния (I – нивелир, B – рейка); б – кривизна Земли и расстояние d до рейки

Радиус кривизны светового луча равен R / k , где k – коэффициент рефракции. Поэтому аналогично предыдущему получаем $r \approx kd^2 / (2R)$.

Совместное влияние кривизны Земли и рефракции равно

$$f = \Delta h - r = \frac{(1 - k) \cdot d^2}{2R}.$$

В среднем в земной атмосфере $k = 0,14$. При этом $f = 0,43d^2 / R$. Так, если $d = 300$ м, то $f = 6$ мм.

При нивелировании способом «из середины» влияние кривизны Земли полностью, а влияние рефракции в значительной степени нейтрализуется.

Вблизи к земной поверхности рефракция значительно возрастает, поэтому высоту луча визирования менее 0,2 м не допускают.

9.8. Нивелирные сети

Нивелирная сеть представляет собой совокупность закрепленных на местности точек, высоты которых определены путем геометрического нивелирования.

Основой для определения высот пунктов в Республике Беларусь служит *государственная нивелирная сеть* I, II, III и IV классов.

Главной высотной основой страны является государственная нивелирная сеть I и II классов, назначением которой является распространение единой системы высот на территорию всей страны. Нивелирные сети I и II классов используются также для решения таких научных задач, как изучение фигуры физической поверхности Земли и ее гравитационного поля, определение разностей высот уровней морей и океанов, изучение вертикальных движений земной коры и др.

Государственная нивелирная сеть I класса имеет наивысшую точность и служит исходной для сетей следующих классов. Нивелирная сеть II класса опирается на пункты I класса, является ее сгущением. Невязки в сетях I и II классов не должны превышать соответственно $3\text{мм}\cdot\sqrt{L}$ и $5\text{мм}\cdot\sqrt{L}$, где L – длина нивелирного хода, выраженная в километрах.

Нивелирные сети III и IV классов опираются на сеть I и II классов и служат основой для создания высотного обоснования топографических съемок местности и решения различных инженерных задач. Невязки в таких сетях не должны превышать соответственно $10\text{мм}\cdot\sqrt{L}$ и $20\text{мм}\cdot\sqrt{L}$.

Пункты государственной нивелирной сети надежно закрепляют на местности с помощью знаков – *реперов*. В зависимости от условий местности и характера грунта реперы бывают грунтовые, скальные и стенные.

Грунтовый репер состоит из железобетонного пилона сечением 16×16 см с маркой вверху и бетонной плитой (якорем) внизу. Марка должна находиться на 0,5 м ниже поверхности земли, а якорь – не менее чем на 0,5 м ниже глубины сезонного промерзания грунта.

Стенной репер – представляет собой вцементированную в стену чугунную марку с выступом для установки на него нивелирной рейки или отверстием для ее подвешивания. Стенные реперы закладывают в цокольной части фундаментальных зданий или сооружений (опора моста, здание пассажирского вокзала, водонапорная башня).

На застроенной территории реперы закладывают не реже чем через 5 км, а на незастроенной – не реже чем через 7 км.

Нивелирование с точностью II, III и IV класса применяется не только в государственной нивелирной сети, но и при геодезическом обеспечении строительства и эксплуатации различных сооружений. Так, на железных дорогах с помощью геометрического нивелирования решаются такие задачи, как съемка профиля пути на станциях и перегонах, контроль проектного уклона путей на сортировочных горках, съемка продольного и поперечных профилей на вновь сооружаемых и реконструируемых железных дорогах, создание высотных съемочных сетей для съемки станций и узлов, создание высотной основы для строительства мостов и тоннелей и др.

Нивелирование II класса используют при наблюдениях за осадками зданий и сооружений.

Техническое нивелирование. На изысканиях автомобильных, железных дорог, трубопроводов и других линейных сооружений, при создании высотного съемочного обоснования выполняют *техническое нивелирование*.

Ход технического нивелирования начинают и заканчивают на пунктах более высокого класса. По форме такие ходы бывают разомкнутыми или замкнутыми.

Для измерения превышений используются точные или технические нивелиры (см. табл. 9.1).

Ход прокладывают в одном направлении. Нивелир устанавливают по возможности на равных расстояниях от передней и задней реек (см. рис. 9.2). При этом расстояния до реек не должны превышать 150 м.

Отсчеты по рейкам берут по среднему штриху сетки нитей, придерживаясь следующей последовательности:

- отсчет по черной стороне задней рейки;
- отсчет по черной стороне передней рейки;
- отсчет по красной стороне передней рейки;
- отсчет по красной стороне задней рейки.

Вычитая из отсчетов по задней рейке отсчеты по передней рейке, вычисляют превышения по черным и красным сторонам, а затем – среднее превышение h_{cp} . Контролем правильности измерений служит разность между превышениями, полученными по черным и красным сторонам реек. Расхождение не должно превышать 5 мм.

Контролем точности измерений в ходе служит невязка f_h , которую вычисляют по формулам:

- в разомкнутом ходе

$$f_h = \sum h_{cp} - (H_{кон} - H_{нач}); \quad (9.2)$$

– в замкнутом ходе

$$f_h = \sum h_{cp}. \quad (9.3)$$

где $\sum h_{cp}$ – сумма средних превышений в ходе; $H_{кон}$ и $H_{нач}$ – высоты конечного и начального реперов.

Невязка f_h считается допустимой, если она по абсолютной величине не превышает $50\text{мм} \cdot \sqrt{L}$, где L – длина хода, выраженная в километрах.

Невязку равномерно распределяют в измеренные превышения. Поправку к превышению вычисляют по формуле $\delta_h = -f_h / n$, где n – число превышений в ходе. Поправками исправляют измеренные превышения: $h'_i = h_i + \delta_h$. Используя исправленные превышения, последовательно вычисляют отметки всех точек нивелирного хода:

$$H_{i+1} = H_i + h'_i \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

9.9. Тригонометрическое нивелирование

Тригонометрическое нивелирование – определение превышений по измеренным вертикальным углам и расстояниям.

Для определения превышения между точками A и B (рис. 9.9) на точке A устанавливают теодолит, а на точке B – рейку. Теодолитом измеряют угол наклона v .

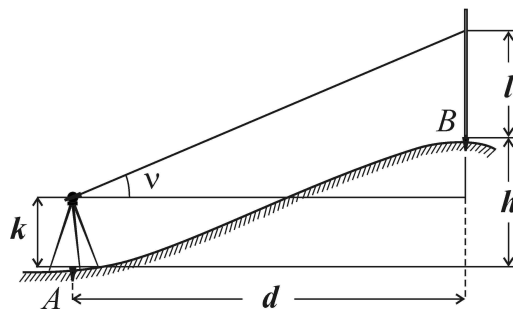


Рис. 9.9. Тригонометрическое нивелирование

Если известно горизонтальное расстояние d между точками A и B , то превышение h вычисляют по формуле

$$h = d \cdot \operatorname{tg} v + i - l, \quad (9.4)$$

где v – угол наклона, i – высота прибора, l – высота визирования.

Если расстояние AB измерено нитяным дальномером, то горизонтальное расстояние равно $d = Kn \cos^2 v$, где K – коэффициент дальномера и n – разность отсчетов по рейке по дальномерным нитям. Подставляя это выражение для d в формулу (9.4), получаем

$$h = K \cdot n \cdot \cos^2 v \cdot \operatorname{tg} v + i - l$$

и окончательно

$$h = \frac{1}{2} K \cdot n \cdot \sin 2v + i - l. \quad (9.5)$$

Формула (9.5) находит применение при тахеометрической съемке местности и носит название тахеометрической формулы для превышений.

Вычисленные превышения в прямом и обратном направлениях не должны различаться более 4 см на 100 м хода.

Допустимая высотная невязка по ходу (в см)

$$f_h = \pm \frac{[S]}{25 \cdot \sqrt{n}}, \quad (9.6.)$$

где n – число линий в ходе; $[S]$ – длина хода в метрах.

Невязка распределяется в виде поправок в измеренные превышения пропорционально длинам сторон хода.

По высоте точки съемочного обоснования должны соответствовать точности обоснования для съемки заданного масштаба.

9.10. Сведения о современных нивелирах

Лазерные нивелиры содержат оптический квантовый генератор (ОКГ), который используется в светодальномерах. Пучок лазерных лучей на выходе из ОКГ расходится приблизительно на 30" и для уменьшения угла расходимости светового пучка его фокусируют, пропуская через коллиматор. В качестве коллиматора можно использовать зрительную трубу геодезического прибора. Для приведения лазерного луча в горизонтальное положение применяют цилиндрический уровень или оптический компенсатор малых наклонов. При падении лазерного пучка на шкалу вертикально поставленной нивелирной рейки отсчет деления берут в центре светового пятна (визуальная регистрация). При автоматизированном нивелировании используют рейки с фотоэлектрическими ячейками.

В лазерных приборах, предназначенных для геометрического нивелирования на площади или в круговом секторе, лазерный пучок вращается в горизонтальной плоскости и на предметах распознается горизонтальная световая полоса (видимый след горизонтальной плоскости), точки которой можно фиксировать автоматически с помощью реек с фотоэлектрическими ячейками. Световую полосу распознают также визуально на рейках, на стенах сооружения или же на поверхности подземной выработки и отмечают точки горизонта прибора.

При визуальной регистрации неподвижного лазерного пятна в солнечную погоду расстояние от прибора до рейки ограничивают до 100 – 200 м (в тени) и до 500 – 1000 м при фотоэлектрической регистрации с защитой рейки от прямых солнечных лучей. Точность нивелирования характеризуется погрешностями до 5 – 10 мм на расстояниях до 100 м.

Кодовые (цифровые) нивелиры обеспечивают максимальную автоматизацию нивелирных работ. На нивелирные рейки нанесены штрих-кодовые шкалы. При наведении трубы на рейку положение линии визирования относительно штрихов кодовой шкалы обрабатывается в приемном электронно-вычислительном модуле с высокой точностью (0,1 – 0,01 мм). В блок памяти кодового нивелира вводят информацию об отметках начального и конечного пунктов нивелирного хода, на каждой станции вводят ее номер, обозначения ее точек и другие данные. Зрительную трубу последовательно наводят на заднюю и переднюю рейки, нажимают клавишу «Отсчет». Автоматические отсчеты производятся по двум сторонам рейки, их значения записываются в оперативную память и в карту памяти.

К современным высокоточным нивелирам относятся цифровые нивелиры DNA03 фирмы LEICA, предназначенные для нивелирования I и II класса (погрешность превышения на 1 км двойного хода 0,3 мм). Приборы оснащены маятниковым компенсатором, электронно-вычислительным блоком, в котором обрабатываются текущие результаты нивелирования.

Набор встроенных программ включает:

- фиксирование отсчетов по рейкам и определение расстояний до них;
- вычисление превышений и отметок;
- высотную привязку нивелирного хода к реперам;
- обработку нивелирного хода с набором промежуточных пикетных точек и вычислением их высот и др.

Результаты текущих измерений (отсчет по рейке, горизонтальное расстояние до нее, превышение, горизонт прибора, отметка точки) отображаются на дисплее блока и одновременно записываются в карту памяти. Нивелир можно использовать в режиме оптических измерений с метрическими рейками (при этом погрешность суммарного превышения составляет 2 мм на 1 км двойного хода). Цифровой нивелир DNA10 предназначен для инженерно-технических работ с высокой точностью (погрешность измерения превышения 1 – 1,5 мм на 1 км двойного хода). Прибор обладает описанными выше функциональными возможностями.

ТЕМА 10. СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

10.1. Общее понятие о системах спутниковой навигации

Спутниковые Навигационные Системы (СНС) – специальный комплекс космических и наземных технических средств, программного обеспечения и технологий, предназначенных для решения широкого круга актуальных задач, связанных, прежде всего, с оперативным и точным определением местоположения объектов относительно Земного сфероида при решении навигационных, оборонных, инженерно-геодезических, геолого-разведочных, экологических и других задач.

Спутниковые навигационные комплексы, созданные впервые в США – NAVSTAR и в СССР – ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), вошли в международную практику решения военных, навигационных, инженерных и других проблем под названием «Global Positioning System» (GPS) или дословно – Глобальная Система Позиционирования (местопределения). Поэтому в дальнейшем Спутниковые Навигационные Системы (СНС) будем называть, используя международную аббревиатуру GPS.

Принципы функционирования GPS основаны на определении местоположения по расстояниям до группы высокоорбитальных навигационных искусственных спутников Земли, выполняющих роль точно координированных точек отсчета (подвижных пунктов геодезической сети).

Каждая из систем спутниковой навигации состоит из трех самостоятельных подсистем: А, Б и В.

А – подсистема орбитального комплекса, состоящая из высокоорбитальных искусственных спутников Земли (ИСЗ) и средств вывода их на орбиты. Каждый спутник имеет на борту несколько высокоточных атомных часов – эталонов частоты. Спутники постоянно транслируют координатные радиосигналы и навигационные сообщения и создают тем самым единое глобальное навигационное поле.

Создание в нашей стране орбитального комплекса ГЛОНАСС штатного состава из 24 навигационных спутников было начато в октябре 1982 г. и завершено в декабре 1995 г. Искусственные спутники ГЛОНАСС равномерно распределены в трех орбитальных плоскостях, разнесенных относительно друг друга на 120° . Плоскостям соответственно присвоены номе-

ра 1, 2 и 3 с возрастанием в сторону вращения Земли, при этом номинальные значения абсолютных долгот идеальных плоскостей зафиксированы:

$$215^{\circ}15'00'' + 120^{\circ}(i - 1),$$

где i – номер орбитальной плоскости.

Номинальные расстояния между соседними спутниками ГЛОНАСС по аргументу широты составляют 45° . Спутникам 1-й орбитальной плоскости присвоены номера с 1 по 8, спутникам 2-й орбитальной плоскости – с 9 по 16 и спутникам 3-й орбитальной плоскости – с 17 по 24. Орбитальные плоскости сдвинуты относительно друг друга по аргументу широты на 15° .

Навигационные спутники системы NAVSTAR размещены в шести орбитальных плоскостях, по четыре спутника в каждой [17].

Высота орбиты навигационных спутников системы ГЛОНАСС – 19100 км, системы NAVSTAR – 20180 км.

Период обращения спутников системы ГЛОНАСС – 11 ч 15 мин 44 с, системы NAVSTAR – 12 часов.

Наклонение орбиты системы ГЛОНАСС – $64,8^{\circ}$, системы NAVSTAR – $55,0^{\circ}$.

Такая конфигурация орбитальной структуры спутниковых навигационных систем обеспечивает глобальную и непрерывную зоны действия системы, а также оптимальную геометрию взаимного расположения спутников для повышения точности определения координат.

Навигационные спутники систем GPS непрерывно излучают радиосигналы различной точности. Так, для системы ГЛОНАСС предусмотрены навигационные сигналы двух типов:

- высокой точности (ВТ) – предназначен исключительно для решения задач Министерства обороны РФ;
- стандартной точности (СТ) – доступен всем потребителям.

Для системы NAVSTAR предусмотрены навигационные сигналы трех типов:

- Protected (P-code) – защищенный, предназначенный, прежде всего, для нужд Министерства обороны США;
- Selective Availability (S/A) – избирательной доступности, преднамеренно создавая значительный и непредсказуемый уход спутниковых часов, создает значительные ошибки в определении местоположения для общегражданского круга пользователей;
- Clear Acquisition (C/A) – легкой распознаваемости, т. е. это общегражданский код.

Б – наземная подсистема контроля и управления состоит из группы станций слежения, нескольких станций загрузки на ИСЗ и главной станции. Эта подсистема осуществляет мониторинг целостности системы и является первичным источником информации, поставляемой пользователям. Ее основными задачами являются:

- контроль за работой навигационных ИСЗ;
- сбор информации для определения и прогноза орбит (эфемерид);
- формирование единой временной системы всего орбитального комплекса и ее синхронизация относительно Всемирного времени и экспортирование данных в память бортовых компьютеров навигационных ИСЗ.

В – подсистема пользователей состоит из комплекса аппаратно-программных средств, реализующих основное назначение GPS – определение координат для геодезического применения.

Главными факторами широкого использования аппаратуры пользователей GPS являются:

- всепогодность;
- оперативность первого определения координат (менее 3 мин от включения приемника);
- непрерывность определения координат (каждые 0,5 с);
- высокая точность.

Данные позиционирования представляются в любом удобном для пользователя цифровом виде, в различных географических системах координат или в любой прямоугольной системе координат с возможностью описания и систематизации объектов позиционирования.

10.2. Принципы определения координат точек местности с использованием GPS

Основной принцип GPS – использование навигационных ИСЗ в качестве подвижных геодезических пунктов (точно координированных точек отсчета) для определения расстояний до них по времени распространения излучаемых ими радиосигналов и вычисления координат на Земле на основе тригонометрических соотношений.

Если предположить, что точное местоположение любого используемого навигационного спутника системы в любой момент времени известно и известно, как определить расстояния до каждого из них, то основополагающая идея GPS оказывается простой.

Допустим, мы не знаем своих координат и пытаемся их определить, используя для этой цели навигационный спутник А, находящийся в настоящий момент времени на расстоянии 21 000 км от нас (рис. 10.1).

Очевидно, область нашего местонахождения в космическом пространстве резко сократится и нас следует искать где-то на сфере с центром в спутнике А и радиусом 21 000 км.

Если же при этом известно, что расстояние от искомой точки до второго навигационного спутника В составляет 22 000 км, то единственной областью местонахождения будет линия пересечения двух сфер с центром в спутнике А и радиусом 21 000 км и с центром в спутнике В и радиусом 22 000 км, т. е. окружность (рис. 10.2).

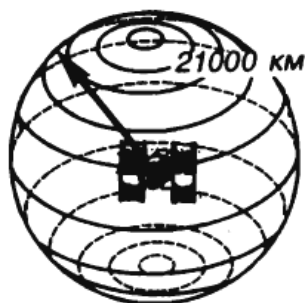
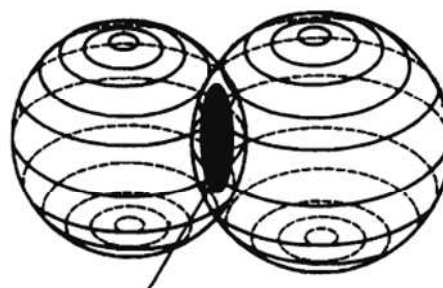


Рис. 10.1. Определение области местоположения точки по одному навигационному спутнику Земли

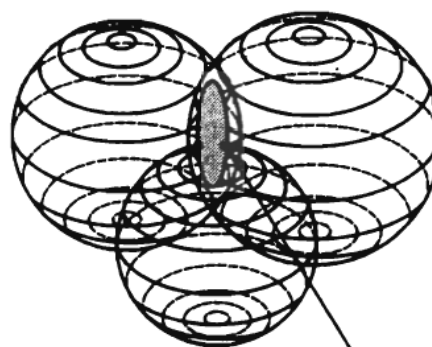


*Измерение двух расстояний
дает линию возможного
местоположения в виде окружности*

Рис. 10.2. Определение области местоположения точки по двум навигационным спутникам Земли

И наконец, если измерить расстояние еще и до третьего навигационного спутника С, равное скажем 23 000 км, то возможное местоположение искомой точки уже будет сведено всего к двум точкам, находящимся на пересечении сферы с радиусом 23 000 км с окружностью, полученной от пересечения сфер с радиусами 21 000 и 22 000 км (рис. 10.3).

Обычно одно из двух возможных решений является нереальным – например, точка расположена слишком далеко от поверхности Земли, либо имеет неправдоподобно



*Измерение трех расстояний
дает две возможные точки
местоположения*

Рис. 10.3. Определение местоположения точки по трем навигационным спутникам Земли

большую скорость. Поэтому, программное обеспечение компьютеров приемников GPS автоматически выделяет истинное местоположение искомой точки из двух возможных. Таким образом, чтобы определить точное местоположение точки, *теоретически* достаточно трех измерений до трех навигационных спутников. Однако, как будет установлено далее, существует техническая причина, по которой для точного определения местоположения точки требуется еще и, как минимум, четвертое измерение до четвертого навигационного спутника.

Определив расстояния, как минимум, до четырех навигационных спутников (подвижных геодезических пунктов), в дальнейшем для определения координат (местоположения) точки, решают обычную задачу обратной линейной засечки.

10.3. Измерение расстояний до навигационных спутников GPS

В связи с тем, что любая GPS основана на определении расстояний до навигационных спутников, очевидно должны быть разработаны и соответствующие методы их определения.

Основной принцип определения расстояний до навигационных спутников состоит в измерении времени, за которое радиосигнал спутника достигает приемника на Земле, и в последующем вычислении по этому времени искомого расстояния.

Поскольку радиоволны распространяются с огромной скоростью (около 300 000 км/с), нужно уметь очень точно определять момент выдачи сообщения навигационным спутником и момент его приема приемником GPS на Земле. Разница (сдвиг) во времени выдачи сигнала спутником и его приемом на Земле даст время распространения сигнала a , следовательно, и расстояние до данного спутника. При таком подходе часы в системе должны быть исключительно точными и совершенными. При ошибке в определении времени распространения радиосигнала всего на 0,01с ошибка в определении расстояния составит порядка 3000 км.

На каждом навигационном спутнике установлен комплект из 4-х самых точных *атомных часов*, которые чрезвычайно дороги и громоздки. На всех приемниках GPS вынужденно, устанавливаются очень дешевые и компактные *кварцевые часы*, которые, однако, существенно уступают по точности хода атомным.

Главной трудностью определения времени распространения радиосигнала является точное выделение момента времени, в которое радиосигнал был передан со спутника. В системах GPS эта задача решена синхронизацией сигналов навигационных спутников в Космосе и приемников GPS на Земле таким образом, чтобы они точно в одно и то же время генерировали один и тот же бинарный (двоичный) код. Бинарный код – это очень сложная, тщательно подобранная и кажущаяся случайной последовательность логических нулей и единиц, которая повторяется каждую миллисекунду. Такие специально усложненные коды (для надежности и однозначности их сравнения) называют *псевдослучайными кодами* (рис. 10.4).

Учитывая, что псевдослучайные коды на спутниках и приемниках строго синхронизированы, для определения времени распространения радиосигнала и, следовательно, расстояния до данного спутника, достаточно принять от него радиосигнал и сопоставить его с точно таким же псевдослучайным кодом приемника. Сдвиг одного кода по отношению к другому будет соответствовать времени прохождения радиосигнала от навигационного спутника до приемника GPS (рис. 10.5).

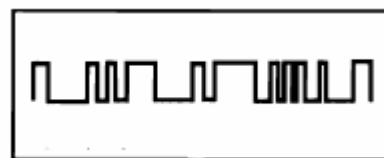


Рис. 10.4. Псевдослучайный код

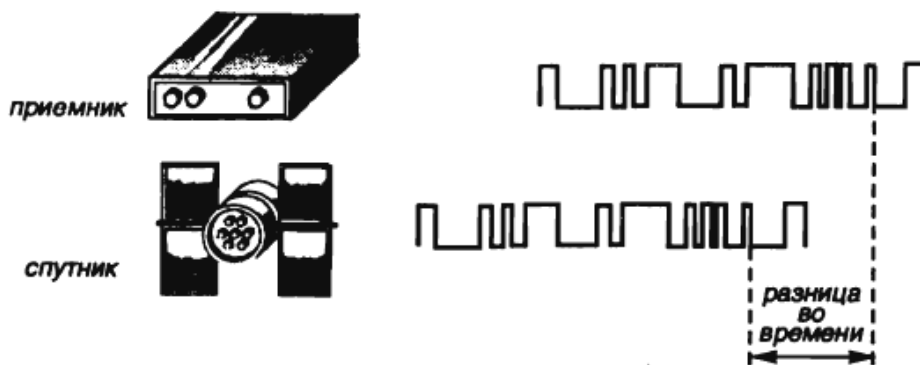


Рис. 10.5. Определение времени распространения радиосигнала по сдвигу псевдослучайных кодов

Поскольку точность измерения времени распространения радиосигнала кварцевыми часами приемников существенно уступает точности хода атомных часов навигационных спутников, возникает проблема устранения смещения шкалы времени приемников GPS.

Можно легко установить, что если *три точных* измерения времени распространения радиосигналов спутников позволяют определить точное местоположение точки в трехмерном пространстве, то же самое обеспечивают *четыре неточных* измерения времени.

Для облегчения понимания этого принципа рассмотрим решение этой задачи в двухмерном пространстве, т. е. на плоскости, временно исключив одно измерение.

Представим себе, что мы находимся на расстоянии в 4 с от спутника А и в 6 с от спутника В. Этих двух точных измерений было бы достаточно для однозначного определения местоположения точки 1 на плоскости (рис. 10.6).

Таким образом, местоположение точки 1 было бы установлено, если бы часы приемников GPS были бы столь же совершенны, как и атомные часы на навигационных спутниках. Теперь представим себе, что условно часы в приемниках отстают на одну секунду. Тогда расстояния до искомой точки были бы установлены с соответствующими ошибками и составили соответственно до спутника А – 5 с и до спутника В – 7 с. В результате положение искомой точки 1 было бы ошибочно определено в точке 2 (рис. 10.6).

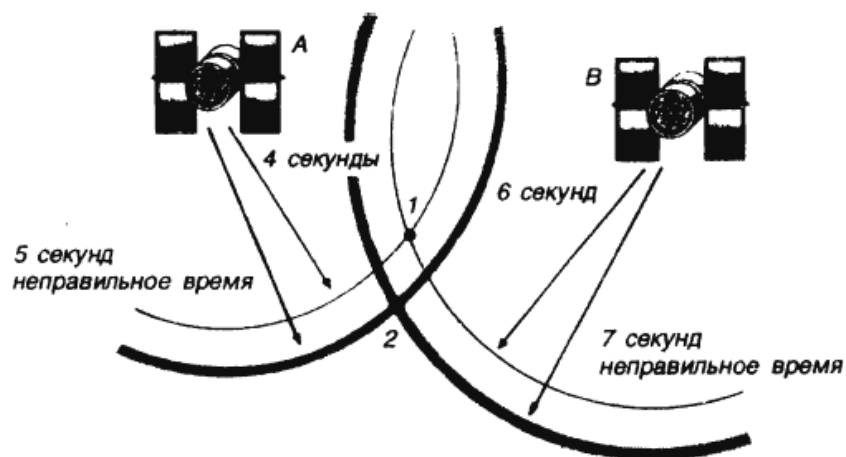


Рис. 10.6. Определение местоположения точки на плоскости по двум измерениям: 1 – по двум точным измерениям; 2 – ошибочное определение местоположения точки по двум неточным измерениям

Следует иметь в виду, что внешне это бы выглядело абсолютно правильным результатом, поскольку у нас нет возможности установить, что часы приемника отстают.

Если к этим построениям добавить еще одно измерение, что в двухмерном пространстве означает измерение расстояния до спутника С, равного, скажем, 8 с, то все три точных измерения дадут положение искомой точки 1 на пересечении трех соответствующих окружностей (рис. 10.7).

Если учесть, что часы приемника несколько отстают, то в результате трех неточных измерений будут получены три возможных местоположения одной искомой точки (точки 2, 3 и 4), которая может одновременно находиться на расстояниях 5, 7 и 9 с соответственно от спутников А, В и С, что физически невозможно (рис. 10.8).

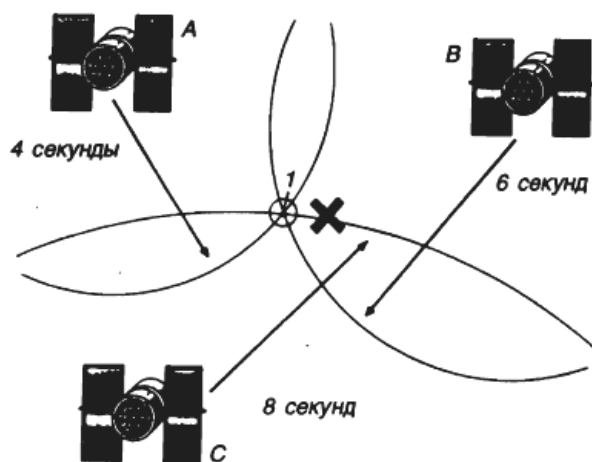


Рис. 10.7. Определение местоположения точки 1 на плоскости по трем точным измерениям

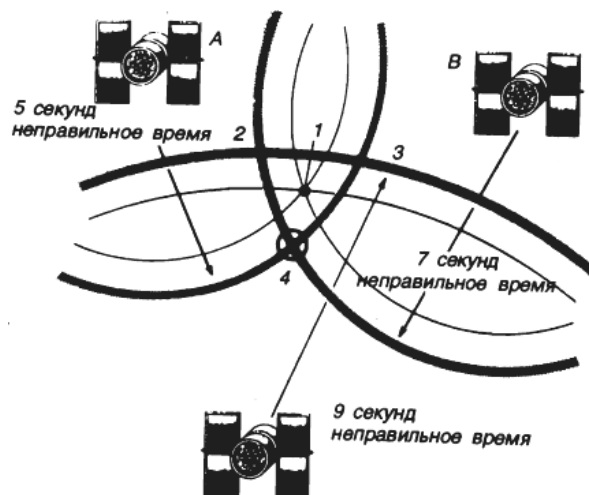


Рис. 10.8. Определение местоположения точки на плоскости по трем неточным измерениям: 1 – точное местоположение точки; 2, 3, 4 – варианты ошибочного определения местоположения

Тонкие линии окружностей на рис. 10.7 и 10.8 соответствуют не истинным дальностям, а так называемым «псевдодальностям», т. е. расстояниям, измеренным по неточным часам приемников GPS. Если начать изменять ошибочные расстояния с некоторым одинаковым шагом (в данном случае уменьшать), то можно, в конце концов, прийти не к трем, а к единственному правильному решению в точке 1. Точное местоположение точки 1 можно также установить, решив систему из трех уравнений с тремя неизвестными (правильными расстояниями до спутников). Таким образом, в двумерном пространстве (на плоскости) три неточных измерения дают тот же точный результат, что и два точных измерения.

Программное обеспечение компьютеров приемников GPS построено так, что когда в них поступают измерения, не дающие пересечения в одной точке, то в результате решения, по меньшей мере, четырех уравнений с четырьмя неизвестными (для трехмерного пространства) находится единственная точка, соответствующая исправленным значениям расстояний до четырех навигационных спутников, т. е. таким образом, устраняется неточность хода часов приемника.

Для определения точного местоположения искомой точки в трехмерном пространстве требуется, по меньшей мере, четыре неточных измерения расстояний (псевдодальностей) до четырех навигационных спутников.

Для определения с необходимой точностью местоположения точек в системах GPS учитывают и другие возможные источники ошибок.

Поскольку в системах GPS навигационные искусственные спутники Земли используются как точки отсчета (т. е. как подвижные пункты геодезической сети), то орбиты спутников и местоположение каждого из них на орбитах (эфемериды) должны быть в любой момент времени точно известны. Поэтому каждый приемник GPS содержит в памяти своего компьютера *альманах*, т. е. непрерывно обновляемый справочник, из которого может быть определено точное местоположение любого спутника орбитального комплекса на любой момент времени.

Незначительные отклонения местоположения навигационных спутников от теоретических орбит (ошибки эфемерид), связанные с влиянием гравитационного поля Солнца и Луны, а также давления солнечного света, обнаруживаются наземными контрольными станциями слежения. Вычисленные поправки к орбитам передаются обратно на спутники, заменяя собой прежнюю информацию в памяти бортовых компьютеров. Спутники помимо непрерывной подачи кодовых радиосигналов ежеминутно передают на Землю поправки к своему орбитальному положению, обновляя альманахи каждого приемника GPS.

И, наконец, в системах GPS учитывают погрешности, связанные с задержками прохождения радиосигналов через ионосферу и тропосферу Земли. Эти погрешности учитывают либо введением усредненных поправок, либо использованием специальных приемников, работающих на двух радиосигналах разной частоты. В последнем случае, *ионосферные и тропосферные задержки* прохождения радиосигналов определяются непосредственно в ходе измерений, поскольку они *обратно пропорциональны квадрату частоты радиоизлучения*.

Необходимость для определения местоположения точек измерения расстояний, по меньшей мере, до четырех навигационных спутников, необходимость учета разнообразных погрешностей измерения расстояний, а также назначение производимых измерений предопределили большое разнообразие конструкций приемников GPS.

10.4. Приемники GPS

Все, получившие распространение в практике производства инженерных работ приемники, можно условно разделить на две обширные группы.

К *первой группе* относят приемники, работающие по принципу последовательного (поочередного) отслеживания и измерений расстояний до навигационных спутников рабочего созвездия.

Ко *второй группе* – приемники, отслеживающие и обеспечивающие измерение расстояний одновременно до четырех и более навигационных спутников, т. е. ведущие измерения параллельно.

Внутри каждой из этих двух групп существует большое разнообразие GPS-приемников различного назначения и конструктивных особенностей.

Одноканальные приемники, наиболее экономичные и дешевые, используют в тех случаях, когда не требуется вести измерения «в режиме реального времени», т. е. непрерывно и не требуется измерения скорости объекта, на котором установлен приемник. Прежде чем вычислить координаты местоположения, одноканальный приемник должен выполнить последовательно четыре отдельных измерения до четырех различных спутников. Вся операция по определению координат одной точки может занимать от 2 до 30 с, что во многих случаях может оказаться вполне приемлемым.

Тем не менее, одноканальным приемникам свойственны некоторые недостатки:

- с помощью такого приемника нельзя производить измерения с подвижного объекта (например, с автомобиля при кинематической съемке плана и продольного профиля автомобильной дороги);

- в ходе каждого цикла из четырех измерений приемник должен оставаться неподвижным;

- работа одноканальных приемников по определению координат прерывается в моменты, когда навигационные спутники передают свои информационные сообщения, прием и расшифровка каждого из которых занимает около 30 с.

Двухканальные приемники работают по следующему принципу. Когда один канал приемника производит обработку результатов временных измерений до одного спутника, другой канал устанавливает радиокontakt с очередным спутником для проведения измерений. Закончив цикл частичной обработки данных, первый канал мгновенно переключается на измерения до очередного спутника без потери времени на его «захват» и «прослушивание». Тем временем второй канал, называемый *административным*, обращается к следующему спутнику и т. д. Административный канал применяется для приема информационных сообщений спутников без прерывания процесса определения координат местоположения и может

быть использован для обработки временных измерений. Кроме того, современные двухканальные приемники программируются для слежения за более чем четырьмя спутниками и в тех случаях, когда за одним из рабочих спутников оказывается потерян контроль, мгновенно используется другой, без перерыва процесса определения координат. Все это существенно ускоряет работу приемников.

Многоканальные приемники (непрерывного слежения). Такие приемники одновременно отслеживают 4 и более спутников. Многоканальные приемники, используемые при производстве инженерно-геодезических работ, могут иметь 4, 6, 8, 10, 12 и даже 24 канала слежения. Кроме очевидного преимущества – непрерывного определения координат в режиме реального времени, скорости и траектории движения, многоканальные приемники могут обрабатывать сигналы всех спутников рабочего созвездия, видимых в настоящий момент на небосклоне, а некоторые приемники одновременно и спутников разных орбитальных систем: NAVSTAR (США) и ГЛОНАСС (Россия).

Одночастотные и двухчастотные приемники. Кроме приемников (одно/двухканальных и многоканальных), работающих на одной частоте радиоволн, в практике инженерно-геодезических работ используют и многоканальные двухчастотные приемники, работающие с использованием кодов на двух частотах: 1575,72 и 1227,6 МГц. Приемники такого уровня обеспечивают более точное определение координат точек местности, в связи с возможностью дифференцированного учета для каждого рабочего спутника ионосферных и тропосферных задержек, а также обеспечивают быструю инициализацию (присваивание начальных значений) приемника, что особенно актуально в местах, где могут часто блокироваться сигналы спутников.

По точности определения координат и назначению различают приемники следующих классов:

- навигационного класса с точностью определения координат 150 – 200 м;
- класса картографии и ГИС с точностью определения координат 1 – 5 м;
- геодезического класса с точностью определения координат до 1 см.

Приемники навигационного класса точности призваны решать главным образом навигационные задачи на транспорте, в народном хозяйстве (например, при поиске полезных ископаемых и т. д.) и отдыхе.

Приемники класса точности картографии и ГИС также относительно дешевы и доступны проектно-изыскательским и строительным организациям.

Точность приемников класса картографии и ГИС может быть существенно повышена при базовом варианте их использования в случае применения базовых станций, и они могут быть использованы при решении большинства инженерно-геодезических задач, включая задачи, решаемые в режиме реального времени (например, съемка и составление продольного профиля существующей автомобильной дороги с движущегося автомобиля).

Приемники геодезического класса точности весьма недешевы, однако даже в автономном режиме работы обеспечивают определение координат точек местности с точностью до 1 – 3 см в кинематическом режиме и до 1 см при статических измерениях, и поэтому применимы для решения практически любых инженерно-геодезических задач.

Приемные устройства, составляющие подсистему аппаратуры, достигли высокой степени совершенства. Спутниковые приемники, изготавливаемые на основе высоких технологий, обладают высочайшей степенью надежности и рассчитаны на интенсивную эксплуатацию на протяжении многих лет.

Спутниковое оборудование для геодезии в настоящее время выпускают более 50 производителей различных стран мира, основными из которых являются фирмы *Trimble* и *Ashtech-Magollan* (США), *Leica* (Швейцария), *Sercel* (Франция), *Geotronics* (Швеция) и др. Большинство производимых приемников работают со спутниками GPS. Однако с вводом в эксплуатацию российской системы ГЛОНАСС наиболее перспективным считается направление в использовании приемников, работающих по двум спутниковым системам.

Фирма *Trimble Navigation Ltd* является одной из первых компаний, выпускающих GPS-приемники для гражданского применения.

Одночастотный *GPS-приемник 4600LS Surveyor* (рис. 10.9, а), предназначенный для создания опорных сетей, определения границ и топографических съемок, имеет 12 каналов, т. е. одновременно способен принимать сигналы 12 спутников. Прибор имеет небольшие размеры; GPS-приемник, антенна и батареи питания объединены в единый блок массой 1,7 кг. Для работы не требуется внешних источников питания и дополнительных соединительных кабелей. Наличие только одной клавиши управления и трех светодиодных индикаторов позволяет легко контролировать процесс выполнения измерений. Точность определения длин базовых ли-

нии для статических измерений – $10 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$, для кинематической съемки – $20 \text{ мм} + 2 \text{ мм/км}$.

Приемник *Dimension* фирмы *Ashtech* (рис. 10.9, б) также имеет 12 каналов. Приемник и антенна заключены в водонепроницаемый корпус массой 1,5 кг. Приемник выполняет кодовые и фазовые измерения сигналов и может быть использован для определения координат во всех режимах наблюдений спутников GPS.

Спутниковый приемник *GG24 Surveyor* фирмы *Ashtech* (рис. 10.9, в) – первый в мире прибор, использующий для измерений данные от спутников двух навигационных систем – GPS и ГЛОНАСС. Приемник имеет 24 канала – по 12 на каждую спутниковую систему. По своим точностным характеристикам GG24 близок к двухчастотным приемникам и обеспечивает точность определения плановых координат ($5 - 10 \text{ мм}$) + 2 мм/км , высотных – ($10 - 20 \text{ мм}$) + 2 мм/км . Возможность работы по объединенному созвездию спутников делает этот прибор незаменимым при измерениях в условиях плохой видимости небесной сферы, в карьерах, сильно пересеченной или залесенной местности, городской застройке и техногенных зонах. Область применения приемника – создание опорных геодезических сетей, топографические съемки, межевание земель и инвентаризация земель населенных пунктов.

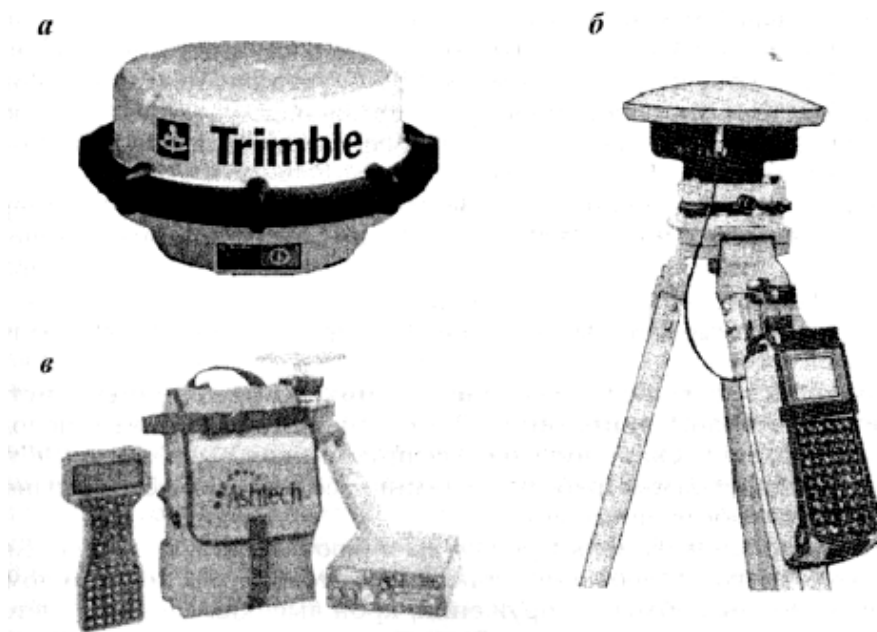


Рис. 10.9. GPS-приемники: а – 4600 LS Surveyor; б – Dimension; в – комплект аппаратуры, объединенной геодезической системы GG24 Surveyor

Российским институтом радионавигации и времени на основе GPS-приемника SR-261 фирмы *Leica* создан комплект спутниковой геодезической аппаратуры «Землемер Л1». Комплект состоит из двух полуккомплектов, в каждый из которых входят антенна, контроллер и связанные с ними вспомогательные средства. Тип приемника – одночастотный шестиканальный. Точность измерений базовой линии в статическом режиме составляет (5 – 10 мм) + 2 мм/км. Информация записывается на карту памяти объемом 512 Кб, устанавливаемую в контроллер. Прибор, отличающийся простотой в эксплуатации и высокой надежностью, хорошо зарекомендовал себя при производстве геодезических и землеустроительных работ.

Современная спутниковая аппаратура позволяет выполнять измерения в любую погоду и любое время суток, не боится воздействия пыли, влаги и газов, имеет малые габариты и вес, малочувствительна к ударам. Высокая точность определения координат позволяет с успехом использовать спутниковые методы для решения широкого спектра геодезических задач.

10.5. Режимы наблюдений

Режимы наблюдений спутниковыми приемниками подразделяют на абсолютные и относительные. При *абсолютных наблюдениях*, используя кодовые измерения, определяют координаты пунктов, а при *относительных* – приращения координат (иногда их называют вектором базы между пунктами).

В геодезической практике часто используются относительные измерения как наиболее точные. Существуют несколько режимов относительных наблюдений, которые, в свою очередь, подразделяются на две группы: статические и кинематические. При любом режиме относительных измерений один из приемников находится на пункте с известными координатами, а другие – на определяемых пунктах.

Статика. Статический режим наблюдений как наиболее точный является основным методом при создании сетей, однако он требует наибольших временных затрат. Время измерения одного пункта колеблется от 40 мин до нескольких часов (в зависимости от требуемой точности измерений, числа и расположения наблюдаемых спутников, состояния ионосферы и т. п.).

Быстрая статика. Быстрая статика – это разновидность статического режима измерений, при котором время наблюдений может быть сокращено до 10 – 15 мин. Информацию о необходимом времени наблюдений оператор получает от приемника, когда получен достаточный объем информации. Чтобы избежать неоднозначности при обработке результатов наблюдений, практикуют возврат приемника на ранее определенный пункт или меняют местами антенны.

Кинематика. При кинематическом режиме измерений передвижной приемник, который иногда называют *роверным* (от англ. *rover* – скиталец), устанавливают в определенных пунктах на короткое время. Такой метод называют «stop and go» («стой и иди»). Кинематический режим измерений начинают с инициализации, т. е. с начальных измерений, при которых выполняется разрешение неоднозначности.

Для инициализации оба приемника устанавливают в нескольких метрах друг от друга, время измерений составляет примерно 15 мин; если роверный приемник устанавливают вдалеке от опорного, то время инициализации увеличивается и может достичь 1 ч.

После завершения инициализации роверный приемник переключают в режим кинематики и перемещают к следующему определяемому пункту. При перемещении роверный приемник должен оставаться в рабочем режиме и обеспечивать прием сигналов от не менее четырех одних и тех же спутников. На закрытой местности и, особенно под мостами могут возникать срывы непрерывных измерений, о чем приемник информирует наблюдателя звуковым сигналом и записью на дисплее. В таком случае необходимо вернуться на один из ранее определенных пунктов или перейти в режим статики и повторить инициализацию приемников. При установке роверного приемника на определяемом пункте оператор записывает его название (или номер), определяет высоту приемника над пунктом и вводит эти данные в приемник.

Кинематика «в полете» (on the fly – OTF). Кинематика «в полете» – это разновидность кинематического режима наблюдений без инициализации приемников. Он используется в тех случаях, когда есть уверенность, что время непрерывного приема достаточного числа спутников составляет не менее 20 мин. За это время накапливается достаточное количество информации для успешного разрешения неоднозначности.

Кинематика в реальном времени. При необходимости выполнить обработку результатов наблюдений на роверном приемнике одновременно с измерениями используют режим «кинематика в реальном времени» (Real Time Kinematics – RTK). С этой целью на опорном приемнике устанавливают радиомодем, который обеспечивает дополнительную цифровую радиосвязь с роверными приемниками, снабженными также приемными радиомодемами. На опорном приемнике вычисляют необходимые поправки в результаты измерений и передают на роверные приемники. На роверных приемниках осуществляется обработка результатов фазовых измерений с учетом принятых поправок. Время получения приращений координат занимает несколько секунд.

В настоящее время спутниковые навигационные системы уже нашли широкое применение во многих областях: военной; на космическом, воздушном, морском, речном, автодорожном, железнодорожном и других видах транспорта; в геодезии, картографии, океанографии; при производстве геофизических и геолого-разведочных работ; в лесном хозяйстве и землеустройстве; рыболовном хозяйстве; в экологическом мониторинге; в научно-исследовательских работах, в том числе, фундаментальных и других сферах человеческой деятельности.

В части инженерной геодезии и инженерного дела спутниковые технологии – это безусловно революционный прорыв в будущее, который влечет за собой как радикальное изменение парка инженерно-геодезического оборудования, так и технологий и методов производства работ.

Лабораторная работа №2

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕОДОЛИТОВ. УСТРОЙСТВО И ОТСЧЕТНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Приборы и принадлежности: теодолиты ТЗ0, 2ТЗ0, 4ТЗ0, штативы.

Литература: [2, 12, 14, 16, 17].

Задание:

1. Ознакомиться с приборами и правилами обращения с ними.
2. Изучить устройство технических теодолитов.
3. Выполнить приведение теодолита в рабочее положение.
4. Осуществить визирование на точку.
5. Снять отсчеты на выбранную точку по горизонтальному и вертикальному кругу.

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Схематическое изображение теодолита с подписанными основными конструктивными элементами.
2. Зарисованное поле зрения микроскопа с индивидуальными отсчетами на точку.

Лабораторная работа №3
ПОВЕРКИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕОДОЛИТОВ.
ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ, ВЕРТИКАЛЬНЫХ УГЛОВ
И МАГНИТНЫХ АЗИМУТОВ

Приборы и принадлежности: теодолиты Т30, 2Т30, 4Т30, штативы.

Литература: [2, 7, 12, 14, 16, 17].

Задание:

1. Выполнить следующие поверки теодолитов:
 - 1.1. Поверка цилиндрического уровня при горизонтальном круге.
 - 1.2. Определение и устранение коллимационной погрешности.
 - 1.3. Поверка равновеликости подставок.
 - 1.4. Поверка установки сетки нитей.
 - 1.5. Определение места нуля и приведение его к нулю.
2. Измерить горизонтальный угол между заданными преподавателем направлениями.
3. Измерить угол наклона на указанную преподавателем точку.
4. Определить магнитный азимут заданного направления.

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Схему взаимного расположения основных осей теодолита.
2. Описание последовательности выполнения поверок теодолитов включая:
 - 2.1. Геометрическое условие расположения осей.
 - 2.2. Ход проверки данного условия (при необходимости с отсчетами) с обязательным выводом – выполняется условие либо не выполняется.
 - 2.3. Юстировка при невыполнении условия.
3. Описание последовательности действий при измерении горизонтальных, вертикальных углов и магнитных азимутов.
4. Заполненный журнал измерения горизонтальных и вертикальных углов.

Лабораторная работа №4
ИЗУЧЕНИЕ ТОЧНЫХ НИВЕЛИРОВ.
ПОВЕРКИ НИВЕЛИРОВ

Приборы и принадлежности: нивелиры Н-3, НВ-1, рейки РН-3, штативы.

Литература: [2, 7, 12, 14, 16, 17].

Задание:

1. Ознакомиться с нивелирами и правилами обращения с ними.
2. Изучить устройство точного нивелира.
3. Научиться снимать отсчеты по рейке и измерять по нитяному дальномеру расстояния от нивелира до рейки.
4. Выполнить следующие поверки и юстировки нивелира:
 - 4.1. Поверка круглого уровня.
 - 4.2. Поверка главного геометрического условия.
 - 4.3. Поверка установки сетки нитей.

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Схематическое изображение нивелира с подписанными основными конструктивными элементами.
2. Зарисованный отсчет по рейке.
3. Схему взаимного расположения основных осей нивелира.
4. Описание последовательности выполнения поверок нивелира:
 - 4.1. Геометрическое условие расположения осей.
 - 4.2. Ход проверки данного условия (при необходимости с отсчетами) с обязательным выводом – выполняется условие либо не выполняется.
 - 4.3. Юстировка при невыполнении условия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО МОДУЛЮ 2

Тема 7. Угловые измерения

1. Назовите основные типы теодолитов.
2. Перечислите основные части теодолита.
3. Дайте определение оси цилиндрического уровня и цены его деления.
4. Какие бывают уровни и каково их устройство?
5. Назовите основные части зрительной трубы.
6. Что называется визирной осью зрительной трубы?
7. Что такое параллакс сетки нитей и как его устранить?
8. Как осуществляют фокусировку прибора при наблюдении на предмет?
9. Опишите порядок установки теодолита в рабочее положение.
10. Как производят отсчет по штриховому и шкаловому микроскопам?
11. Из каких действий складывается установка трубы для наблюдений?
12. Назовите поверки теодолита и порядок их выполнения.
13. Сформулируйте геометрические условия, которым должно отвечать взаимное расположение осей теодолита.
14. Как устраняют обнаруженные в результате проверок погрешности?
15. Как измеряется горизонтальный угол способом приемов?
16. В каких случаях для измерения углов используется способ круговых приемов и как он выполняется?
17. Каково назначение вертикального круга?
18. Что называется местом нуля вертикального круга?
19. Какие измерения теодолитом необходимо выполнить, чтобы определить превышения между точками?
20. Что такое коллимационная погрешность?
21. Можно ли определить расстояние между точками при помощи теодолита?
22. Что такое угол наклона?
23. Перечислите основные оси теодолита.
24. Что такое асимметрия сетки нитей?
25. По каким формулам определяют место нуля?

Тема 8. Линейные измерения

1. Способы измерения длин линий, примеры.
2. Приборы, применяемые для измерения расстояний, их основные характеристики.
3. Как определяется поправка за компарирование?
4. Что такое створ? Способы вешения прямых линий.
5. Техника измерения длин линий лентой, рулеткой. Введение поправок.
6. Принципы работы оптических дальномеров. Схема нитяного дальномера.
7. Вычисление горизонтального проложения линии, измеренной нитяным дальномером.
8. Принципы работы импульсных и фазовых светодальномеров.
9. Технические особенности лазерных рулеток.
10. Классификация светодальномеров по назначению.

Тема 9. Нивелирование

1. Назовите цели и методы нивелирования.
2. Изложите сущность методов геометрического нивелирования.
3. Как при геометрическом нивелировании вычисляют превышения, высоту точек, горизонт прибора и отметки точек относительно горизонта нивелира?
4. Назовите комплект приборов для геометрического нивелирования и требования к точности нивелирных реек, их поверки.
5. Для чего используются нивелирные башмаки и костыли, а также колышки при нивелировании?
6. Назовите основные части нивелира и его геометрические оси, укажите, как должны быть сопряжены основные оси нивелира.
7. Как действует компенсатор?
8. Как выполняется поверка главного условия нивелира с уровнем, нивелира с компенсатором?
9. Что называется горизонтом прибора?
10. Вычислите горизонт прибора, если высота точки A $H_A = 120,843$ м, отсчет по рейке, поставленной на точку A , $a = 1257$ мм. Относительно найденного значения ГП вычислите отметку точки B при отсчете на нее $b = 2500$ мм.
11. Напишите полную формулу тригонометрического нивелирования и частные случаи этой формулы.

12. Какова сущность тригонометрического нивелирования без определения высоты прибора?

13. Теодолит поставлен над точкой A , дальномерная (нивелирная) рейка – на точке B . Отсчет по нитяному дальномеру $D = 120,0$ м; угол наклона $\nu = +3^\circ 36'$; высота прибора $i = 1,35$ м, высота визирования $l = 1,35$ м; отметка точки A $H_A = 218,24$ м. Вычислите отметку точки B .

14. Какова точность отсчета по рейкам при техническом нивелировании?

15. В чем сущность определения превышений способом «вперед»?

16. В чем сущность определения превышений способом «из середины»?

17. Для какой цели производят постраничный контроль при обработке журнала геометрического нивелирования?

18. Каково значение допустимой невязки в ходе технического нивелирования?

19. Как вычисляется невязка в замкнутом и разомкнутом нивелирных ходах?

20. Чему равна сумма исправленных превышений в замкнутом и разомкнутом нивелирных ходах?

Тема 10. Спутниковые методы измерений

1. Назовите основной принцип GPS-координирования.

2. Перечислите основные характеристики навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и NAVSTAR.

3. На чем основано определение расстояний до навигационных спутников?

4. Классификация приемников GPS.

5. Какова точность определения координат точек GPS-методами?

6. Что такое псевдслучайные коды и для чего они используются?

7. В чем сущность статического режима GPS-наблюдений?

8. В чем сущность кинематического режима GPS-наблюдений?

МОДУЛЬ 3

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Дидактические цели модуля 3

Студент должен знать:	Студент должен уметь:
<ul style="list-style-type: none">– виды топографических съемок;– методы создания планового и высотного съемочного обоснования;– способы съемки ситуации;– комплекс работ при производстве теодолитной и тахеометрической съемок;– современные приборы и технологии производства топографических съемок	<ul style="list-style-type: none">– выполнять обработку теодолитных ходов;– составлять план теодолитной съемки;– составлять план тахеометрической съемки;– практически выполнять основные виды топографических съемок

Учебно-информационный блок модуля 3

Темы занятий и рассматриваемые вопросы	Тип занятия	Вид (форма) занятия
<p>ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ</p> <ul style="list-style-type: none">– виды топографических съемок;– плановое и высотное съемочное обоснование;– создание планового съемочного обоснования проложением теодолитных ходов. Определение координат засечками;– создание высотного съемочного обоснования;– теодолитная съемка. Способы съемки ситуации. Построение плана теодолитной съемки;– тахеометрическая съемка. Полевые работы при тахеометрической съемке. Камеральные работы. Автоматизация тахеометрической съемки;– сканерная съемка;– фототопографическая съемка	<p>Приобретение новых научных знаний</p> <p>Углубление и систематизация знаний</p>	<p>Лекция</p> <p>Самостоятельная работа</p>

ТЕМА 11. ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

11.1. Виды топографических съемок

Совокупность действий, выполняемых на местности для получения плана, карты или профиля, называется съемкой.

Основными действиями при съемках являются геодезические измерения:

- *линейные*, в результате которых определяют расстояния между точками местности;
- *угловые*, позволяющие определять горизонтальные и вертикальные углы между направлениями на заданные точки;
- *высотные*, или *нивелирование*, в результате которых определяют превышения между точками местности.

Съемке и отображению на топографических планах подлежат все элементы ситуации местности, существующей застройки, благоустройства, подземных и наземных коммуникаций, а также рельефа местности.

Точки, определяющие на плане положение контуров ситуации, условно делят на *твердые* и *нетвердые*. К *твердым* относят четко определяемые контуры сооружений, построенных из долговременных материалов (кирпича, бетона), например, углы капитальных зданий. Контуры, не имеющие четких границ, например луга, леса, пашни, относят к *нетвердым*.

Если съемка проводится для получения плана с изображением только ситуации, то ее называют *горизонтальной (плановой)*, или *контурной*.

Съемка, в результате которой должен быть получен план или карта с изображением ситуации и рельефа, называется *топографической*. При топографической съемке наряду с другими действиями производят измерения с целью определения высот точек местности, т. е. нивелирование. В зависимости от применяемых приборов и методов различают следующие виды съемок.

Теодолитная съемка – это горизонтальная (плановая) съемка местности, выполняемая с помощью угломерного прибора – теодолита и стальной мерной ленты (или дальномеров различных типов). При выполнении этой съемки измеряют горизонтальные углы и расстояния. В результате съемки получают ситуационный план местности с изображением контуров и местных предметов.

Тахеометрическая съемка выполняется тахеометрами, при этом на местности измеряют горизонтальные и вертикальные углы (или превыше-

ния) и расстояния до точек. По результатам измерений в камеральных условиях строится топографический план местности. Данный вид съемки получил широкое распространение в инженерной практике.

Мензуральная съемка производится с помощью мензулы – горизонтального столика и кипрегеля – специального углоначертательного прибора, снабженного вертикальным кругом и дальномером. В процессе этой съемки топографический план местности составляют непосредственно в поле, что позволяет сопоставлять полученный план с изображаемой местностью, обеспечивая тем самым своевременный контроль измерений. В этом заключается достоинство мензуральной съемки по сравнению с тахеометрической.

Наземная стереофотосъемка выполняется фототеодолитом, представляющим собой сочетание теодолита и фотокамеры. Путем фотографирования местности с двух точек линии (базиса) и последующей обработки фотоснимков на специальных фотограмметрических приборах получают топографический план снимаемого участка местности. Данная съемка применяется при дорожных, геологических и других изысканиях в горной местности, при съемках карьеров, оврагов и т. д.

Аэро- и космическая фотосъемки проводятся специальными аэрофотоаппаратами, устанавливаемыми на летательных аппаратах (самолетах спутниках, дельтапланах и т. д.). Для обеспечения этой съемки на местности выполняют определенные геодезические измерения, необходимые для плано-высотной привязки аэроснимков к опорным точкам местности. Данный вид съемки является наиболее прогрессивным, допускающим широкую механизацию и автоматизацию производственных процессов; он позволяет в кратчайшие сроки получить топографические планы (карты) значительных территорий.

Перспективным направлением в области новых геодезических разработок является **сканерная съемка**, обеспечивающая более эффективное решение геодезических задач.

Нивелирование (вертикальная или высотная съемка) производится с целью определения высот точек земной поверхности.

Буссольная съемка производится с помощью буссоли и мерной ленты для получения ситуационного плана местности. В качестве самостоятельной съемки буссольная съемка в настоящее время не применяется; иногда она используется для съемки небольших участков местности (например, в лесоустройстве и др.), как вспомогательная при других видах съемок.

Глазомерная съемка – контурная съемка местности, выполняемая на планшете с компасом с помощью визирной линейки. При сочетании глазомерной съемки с барометрическим нивелированием можно получить топографический план местности. Глазомерная съемка с самолета (вертолета) называется **аэровизуальной**. В инженерной практике данная съемка применяется при предварительном ознакомлении с местностью (рекогносцировке), а также при изысканиях в неисследованных районах.

11.2. Плановое и высотное съемочное обоснование

Топографическую съемку выполняют с точек местности, положение которых в принятой системе координат известно. Такими точками служат пункты опорных государственных и инженерно-геодезических сетей. Однако их количества, приходящегося на площадь снимаемого участка, большей частью бывает недостаточно, поэтому геодезическая основа сгущается обоснованием, называемым *съемочным*.

Съемочное обоснование развивается от пунктов плановых и высотных опорных сетей. Оно опирается на пункты государственной сети и сетей сгущения, погрешности которых пренебрегаемо малы по сравнению с погрешностями съемочного обоснования.

Точность создания обоснования обеспечивает проведение топографических съемок с погрешностями в пределах графической точности построений на плане данного масштаба. В соответствии с этими требованиями в инструкциях по топографическим съемкам [8,13] регламентируют точность измерений и предельные значения длин ходов.

Наиболее часто в качестве планового обоснования используют теодолитные ходы. На открытой местности теодолитные ходы иногда заменяют рядами или сетью микротриангуляции, а на застроенной или залесенной территории – сетями из четырехугольников без диагоналей.

Высотное обоснование обычно создается в виде сетей нивелирования IV класса или технического нивелирования. На больших площадях при создании высотного обоснования методом геометрического нивелирования получают редкую сеть пунктов, которая в последующем сгущается высотными ходами. В этих ходах превышения определяют тригонометрическим способом. Для получения необходимой точности в инструкциях по топографическим съемкам регламентируют точность измерений превышений, методику их определения и предельные длины высотных ходов.

11.2.1. Создание планового съемочного обоснования проложением теодолитных ходов

Теодолитным ходом называют ход полигонометрии, выполненный методами, достаточными для обеспечения точности, требуемой в съемочных сетях.

По форме теодолитный ход может быть *разомкнутым* – опирающимся на два исходных пункта и два исходных направления (рис. 11.1, а); *замкнутым* – опирающимся на один исходный пункт и одно направление (рис. 11.1, б); *висячим* – разомкнутым ходом, опирающимся на один исходный пункт и одно направление (рис. 11.1, в). Теодолитные ходы могут образовать систему теодолитных ходов с узловыми точками в местах их соединения.

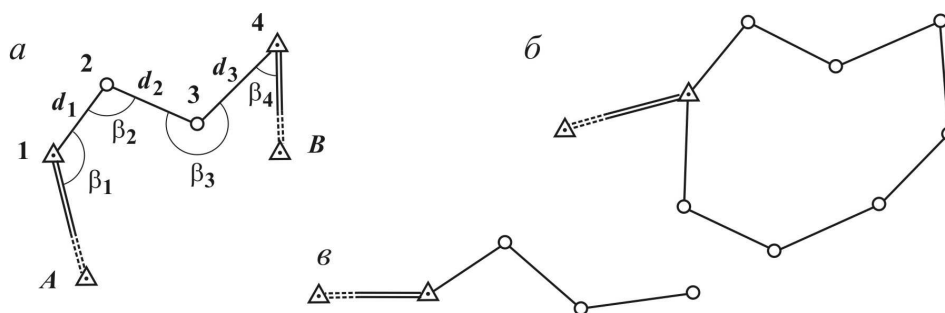


Рис. 11.1. Схемы теодолитных ходов:
а – разомкнутого; б – замкнутого; в – висячего

Проект съемочной сети составляют на топографической карте или плане. Но часто положение ходов выбирают непосредственно на местности в процессе рекогносцировки. При этом учитывают ограничения на длину хода между исходными пунктами, приведенные в табл. 11.1. Длины ходов, опирающихся на узловые точки, уменьшают на 30% [8].

Места для точек хода выбирают так, чтобы обеспечить взаимную видимость между ними, благоприятные условия для съемки окружающей местности, удобство установки геодезических приборов и сохранность точек.

Точки ходов закрепляют деревянными кольями, костылями, металлическими трубами и т. п. Часть точек закрепляют знаками долговременной сохранности – столбами, бетонными монолитами.

Углы поворота теодолитного хода измеряют электронным тахеометром или теодолитом. При этом следят, чтобы на всех точках хода измерялись только правые или только левые по ходу углы.

Для измерения угла в его вершине устанавливают прибор, а в соседних точках – визирные цели. Угол измеряют одним приемом.

Таблица 11.1

Масштаб съемки	Открытая местность, застроенная территория			Закрытая местность	
	Допустимые относительные невязки				
	1/3000	1/2000	1/1000	1/2000	1/1000
	Допустимая длина теодолитного хода, км				
1:5000	6,0	4,0	2,0	6,0	3,0
1:2000	3,0	2,0	1,0	3,6	1,5
1:1000	1,8	1,2	0,6	1,5	1,5
1:500	0,9	0,6	0,3	-	-

Длины сторон измеряют электронным тахеометром или светодальномером, а при их отсутствии – землемерной лентой.

Результаты измерения углов и расстояний записывают в журналы установленной формы. При выполнении измерений тахеометром запись результатов измерений выполняется автоматически – в памяти прибора, откуда в последующем они вводятся для обработки в компьютер.

Обработка разомкнутого теодолитного хода. Исходными данными в разомкнутом ходе (см. рис. 11.1, а) являются координаты начального и конечного пунктов 1 и 4 ($x_{\text{нач}}, y_{\text{нач}}, x_{\text{кон}}, y_{\text{кон}}$) и дирекционные углы начального А-1 и конечного 4-В направлений ($\alpha_{\text{нач}}$ и $\alpha_{\text{кон}}$).

При обработке вручную записи ведут в ведомость установленной формы (табл. 11.2). В графу 1 вписывают названия или номера точек. Вписывают исходные данные: в соответствующие строки графы 3 – начальный и конечный дирекционные углы, а в графы 7 и 8 – координаты начального и конечного пунктов (исходные данные в таблице выделены жирным шрифтом). Вписывают результаты измерений: измеренные углы – в графу 2, горизонтальные проложения сторон хода – в графу 4.

Уравнивание углов. Подсчитывают сумму измеренных углов $\Sigma\beta$. Теоретически эта сумма должна быть равна:

$$- \text{ для правых углов } - \Sigma\beta_{\text{теор}} = \alpha_{\text{нач}} - \alpha_{\text{кон}} + n \cdot 180^\circ;$$

$$- \text{ для левых углов } - \Sigma\beta_{\text{теор}} = \alpha_{\text{кон}} - \alpha_{\text{нач}} + n \cdot 180^\circ,$$

где n – число измеренных углов.

В рассматриваемом примере (табл. 11.2) углы – правые.

Отличие фактической суммы углов от теоретической представляет собой угловую невязку хода:

$$f_\beta = \Sigma\beta - \Sigma\beta_{\text{теор}} \quad (11.1)$$

Вычисленную угловую невязку сравнивают с допустимой:

$$f_{\beta_{\text{доп}}} = 1' \sqrt{n}.$$

Таблица 11.2

Ведомость вычисления координат точек теодолитного хода

Названия точек	Измеренные углы	Дирекционные углы	Длины сторон, м	Приращения координат, м		Координаты, м	
				Δx	Δy	x	y
1	2	3	4	5	6	7	8
A							
	-0,3'	349° 50,0'					
I	113° 26,0'			-0,03	+0,04	6322,70	4057,25
	-0,3	56 24,3	138,56	+76,67	+115,42		
II	85 07,5			-0,03	+0,03	6399,34	4172,71
	-0,3	151 17,1	116,30	-102,00	+55,88		
III	211 44,5			-0,04	+0,05	6297,31	4228,62
	-0,3	119 32,9	197,24	-97,27	+171,59		
IV	56 33,2					6200,00	4400,26
		243 00,0					
B							
$\Sigma\beta = 466^{\circ}51,2'$		$P = \Sigma d = 452,10$		$\Sigma\Delta x = -122,60$	$\Sigma\Delta y = +342,89$		
$\Sigma\beta_{\text{теор}} = (\alpha_{\text{нач}} - \alpha_{\text{кон}} + n \cdot 180^{\circ}) =$ $= 349^{\circ}50,0' - 243^{\circ}00,0' + 4 \cdot 180^{\circ} -$ $- 360^{\circ} = 466^{\circ}50,0'$ $f_{\beta} = \Sigma\beta - \Sigma\beta_{\text{теор}} = +1,2'$ $f_{\beta_{\text{доп}}} = 1' \sqrt{n} = 1' \sqrt{4} = 2,0'$				$x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}} = -122,70; \quad y_{\text{кон}} - y_{\text{нач}} = 343,01;$ $f_x = \Sigma\Delta x - (x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}) = -122,60 + 122,70 = +0,10 \text{ м}$ $f_y = \Sigma\Delta y - (y_{\text{кон}} - y_{\text{нач}}) = +342,89 - 343,01 = -0,12 \text{ м}$ $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = \sqrt{(+0,10)^2 + (-0,12)^2} = 0,16 \text{ м}$ $\frac{f}{P} = \frac{0,16}{452,10} = \frac{1}{2800} < \frac{1}{2000}$			

Если угловая невязка по абсолютной величине меньше допустимой, что указывает на доброкачественность угловых измерений и правильность вычислений, то невязку f_{β} распределяют поровну во все измеренные углы со знаком, противоположным знаку невязки. Полученные при этом поправки

$$\delta_{\beta} = -\frac{f_{\beta}}{n}$$

вписывают над измеренными углами в графу 2 (см. табл. 11.2). Невязка редко делится на число углов без остатка. Поэтому поправки округляют, вводя большие в углы с более короткими сторонами. При этом сумма поправок должна равняться невязке с обратным знаком: $\Sigma\delta_{\beta} = -f_{\beta}$.

Вычисление дирекционных углов. Дирекционные углы вычисляют, используя начальный дирекционный угол $\alpha_{\text{нач}}$ и измеренные углы β_i , исправленные поправками δ_β , по формулам:

$$- \text{ для правых углов } - \alpha_i = \alpha_{i-1} \pm 180^\circ - (\beta_i + \delta_\beta);$$

$$- \text{ для левых углов } - \alpha_i = \alpha_{i-1} \pm 180^\circ + (\beta_i + \delta_\beta),$$

где индексы $i = 1, 2, \dots, n$ соответствуют номерам углов и сторон на рис.11.1, а; причем $\alpha_0 = \alpha_{\text{нач}}$ и $\alpha_n = \alpha_{\text{кон}}$.

Контролем правильности вычислений служит равенство вычисленного и заданного значений конечного дирекционного угла.

Вычисление приращений координат выполняют по дирекционным углам и длинам сторон хода (графы 5 и 6 в табл. 11.2).

$$\Delta x_i = d_i \cos \alpha_i; \quad \Delta y_i = d_i \sin \alpha_i \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1).$$

Вычислив суммы приращения абсцисс $\sum \Delta x$ и ординат $\sum \Delta y$, находят координатные невязки

$$f_x = \sum \Delta x - (x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}), \quad f_y = \sum \Delta y - (y_{\text{кон}} - y_{\text{нач}}). \quad (11.2)$$

Вычисляют абсолютную невязку $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ и относительную невязку хода f/P , где $P = \sum d$ – длина хода. Если относительная невязка не превосходит допустимой (обычно, $1/2000$), то невязки f_x и f_y распределяют (см. записи курсивом в графах 5 и 6), в виде поправок к приращениям координат, пропорциональных длинам сторон, и со знаками, противоположными знакам невязок:

$$\delta x_i = -\frac{f_x}{P} d_i; \quad \delta y_i = -\frac{f_y}{P} d_i. \quad (11.3)$$

Суммы поправок должны равняться невязкам с обратным знаком:

$$\sum \delta_x = -f_x; \quad \sum \delta_y = -f_y.$$

Если из-за выполненных округлений равенства нарушаются, поправки, вычисленные по формулам (11.3), несколько изменяют, добиваясь соблюдения равенств.

Вычисление координат точек теодолитного хода выполняют по формулам (см. графы 7 и 8):

$$x_{i+1} = x_i + \Delta x_i + \delta x_i; \quad y_{i+1} = y_i + \Delta y_i + \delta y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1).$$

Контролем правильности вычислений служит совпадение вычисленных и заданных координат последней точки теодолитного хода.

Обработка замкнутого теодолитного хода.

Последовательность обработки замкнутого хода такая же, как и разомкнутого. Но исходными в замкнутом теодолитном ходе служат координаты одного из пунктов хода и дирекционный угол одной из сторон. Это накладывает на обработку замкнутого хода следующие особенности.

Угловая невязка вычисляется по формуле (11.1), в которой в отличие от разомкнутого хода

$$\sum \beta_{\text{теор}} = 180^\circ(n - 2),$$

где n – число углов в полигоне.

После распределения угловой невязки и вычисления дирекционных углов сторон хода контролируют правильность вычислений – в конце должно быть получено то же значение дирекционного угла, которое было исходным.

Невязки в координатах находят по формулам:

$$f_x = \sum \Delta x, \quad f_y = \sum \Delta y.$$

Эти соотношения следуют из формул (11.2), где в данном случае $x_{\text{нач}} = x_{\text{кон}}, y_{\text{нач}} = y_{\text{кон}}$. Распределив невязки f_x и f_y и вычислив координаты точек хода, контролируют правильность вычислений – вычисленные в конце координаты начальной точки хода должны равняться исходным.

11.2.2. Определение координат засечками

Засечкой называется метод определения координат отдельной точки измерением элементов, связывающих ее положение с исходными пунктами.

Для определения планового положения точки необходимо измерить два элемента. Для контроля, кроме необходимых, выполняют избыточные измерения. Засечки различают прямые, обратные и комбинированные. В *прямой засечке* измерения выполняют на исходных пунктах (рис. 11.2, а, з); в *обратной* – на определяемом пункте (рис. 11.2, б, д); в *комбинированной* – на исходных и определяемом пунктах (рис. 11.2, в). В зависимости от вида измерений засечки бывают угловые (рис. 11.2, а, б, в), линейные (рис. 11.2, з), линейно-угловые (рис. 11.2, д). Измеренные углы на рис. 11.2 отмечены дугами, измеренные расстояния – двумя штрихами.

Рассмотрим вычисление координат в некоторых засечках [14].

Прямая угловая засечка. На исходных пунктах A и B с координатами x_A, y_A, x_B, y_B (см. рис. 11.2, а) измеряют углы β_1 и β_2 . При обработке измерений сначала вычисляют дирекционные углы направлений AP и BP :

$$\alpha_{AP} = \alpha_{AB} - \beta_1; \quad \alpha_{BP} = \alpha_{BA} + \beta_2.$$

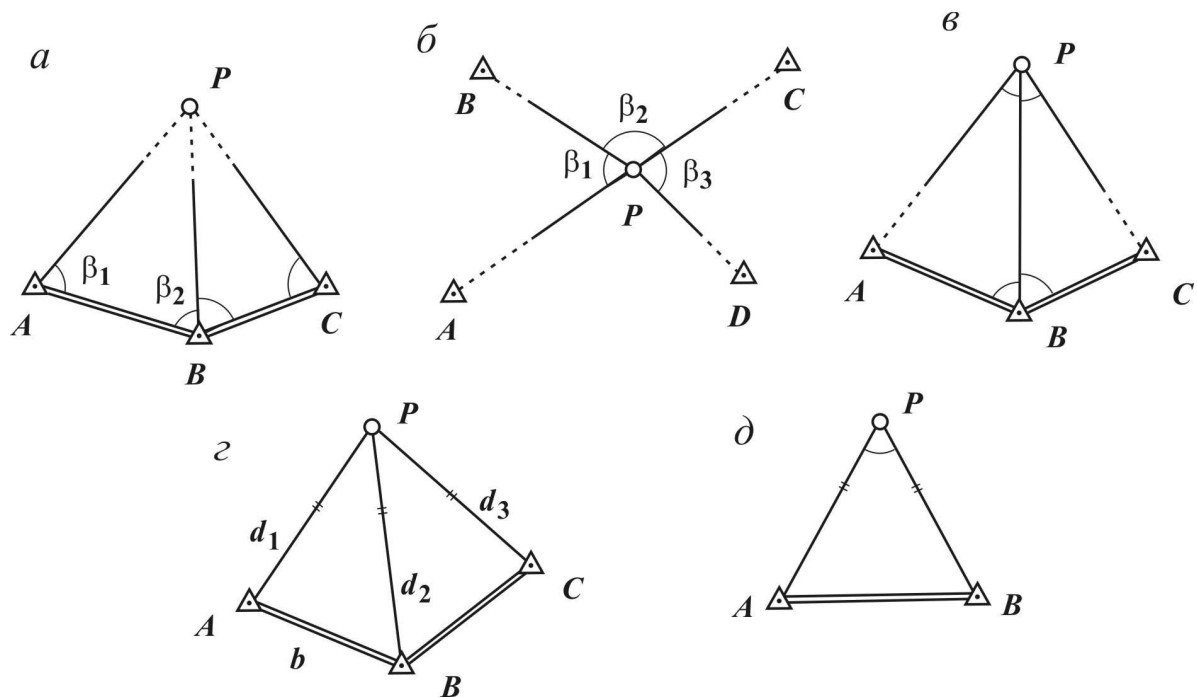


Рис. 11.2. Схемы засечек: *a* – прямая угловая; *б* – обратная угловая; *в* – комбинированная угловая; *г* – линейная; *д* – линейно-угловая

Дирекционные углы с координатами связаны формулами обратной геодезической задачи:

$$\operatorname{tg} \alpha_{AP} = \frac{y_P - y_A}{x_P - x_A}; \quad \operatorname{tg} \alpha_{BP} = \frac{y_P - y_B}{x_P - x_B}.$$

Решая эти уравнения относительно x_P и y_P , получим формулы, по которым вычисляют координаты определяемой точки P (формулы Гаусса):

$$x_P = \frac{x_A \operatorname{tg} \alpha_{AP} - x_B \operatorname{tg} \alpha_{BP} + y_B - y_A}{\operatorname{tg} \alpha_{AP} - \operatorname{tg} \alpha_{BP}}; \quad (11.4)$$

$$y_P = y_A + (x_P - x_A) \operatorname{tg} \alpha_{AP}$$

Для контроля ординату y_P вычисляют вторично по формуле

$$y_P = y_B + (x_P - x_B) \operatorname{tg} \alpha_{BP}.$$

Если один из дирекционных углов α_{AP} или α_{BP} близок к 90° или 270° , то вместо формул (11.4) вычисления выполняют по формулам

$$y_P = \frac{y_A \operatorname{ctg} \alpha_{AP} - y_B \operatorname{ctg} \alpha_{BP} + x_B - x_A}{\operatorname{ctg} \alpha_{AP} - \operatorname{ctg} \alpha_{BP}};$$

$$x_P = x_A + (y_P - y_A) \operatorname{ctg} \alpha_{AP} = x_B + (y_P - y_B) \operatorname{ctg} \alpha_{BP}.$$

Для контроля аналогичные измерения и вычисления выполняют, опираясь на другую исходную сторону BC . За окончательные значения координат определяемой точки принимают средние.

Существуют и иные формулы решения прямой угловой засечки, например, формулы котангенсов углов треугольника (формулы Юнга):

$$x_P = \frac{x_A \operatorname{ctg} \beta_2 + x_B \operatorname{ctg} \beta_1 + y_B - y_A}{\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2}; \quad y_P = \frac{y_A \operatorname{ctg} \beta_2 + y_B \operatorname{ctg} \beta_1 + x_A - x_B}{\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2}.$$

Обратная угловая засечка. На определяемой точке P (рис. 11.2, б) измеряют углы β_1 и β_2 между направлениями на исходные пункты A , B и C . При этом исходные пункты выбирают такие, чтобы они с точкой P не оказались на одной окружности или вблизи нее. Координаты точки P вычисляют по формулам Гаусса (11.4), предварительно вычислив дирекционные углы:

$$\operatorname{tg} \alpha_{BP} = \frac{y_A \operatorname{ctg} \beta_1 - y_B (\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2) + y_C \operatorname{ctg} \beta_2 + x_A - x_C}{x_A \operatorname{ctg} \beta_1 - x_B (\operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{ctg} \beta_2) + x_C \operatorname{ctg} \beta_2 - y_A + y_C}; \quad \alpha_{AP} = \alpha_{BP} - \beta_1.$$

Для контроля измеряют избыточный угол β_3 и вычисляют координаты, используя другую пару измеренных углов.

Линейная засечка. Для определения координат точки P (рис. 11.2, г) измеряют расстояния d_1 , d_2 . По формуле косинусов находят углы треугольника APB . Вычисляют дирекционный угол $\alpha_{AP} = \alpha_{AB} - \angle A$, а затем по формулам прямой геодезической задачи – искомые координаты

$$x_P = x_A + d_1 \cos \alpha_{AP}; \quad y_P = y_A + d_1 \sin \alpha_{AP}.$$

Для контроля измеряют *избыточное расстояние* d_3 и вычисляют координаты из другого треугольника BPC .

11.2.3. Создание высотного съемочного обоснования

Высоты точек съемочного обоснования чаще всего определяют геометрическим или тригонометрическим нивелированием.

Различают нивелирные ходы, опирающиеся на два исходных пункта (начальный репер и конечный репер), и ходы в виде замкнутого полигона, опирающиеся на один исходный пункт. При создании высотного обоснования нивелирные ходы, как правило, прокладывают по точкам планового обоснования. Такое совмещение пунктов удобно для выполнения съемочных работ.

Рекогносцировка нивелирного хода обычно совмещена с рекогносцировкой теодолитного хода. Особое внимание при совместной рекогносцировке обращают на крутые скаты местности, т. к. в этих местах увеличивается число станций в ходе и тем снижается его точность. Поэтому при выборе местоположения хода стараются избежать сторон с крутыми скалами.

Измерение превышений в ходах производят геометрическим либо тригонометрическим нивелированием. Методика данных видов нивелирования приведена в теме № 9.

11.3. Теодолитная съемка

Теодолитной съемкой называют горизонтальную съемку, выполняемую с помощью теодолита и мерных приборов (лент, рулеток) или дальномера.

Теодолитную съемку выполняют для составления крупномасштабных контурных планов внутриквартальной застройки городов, населенных пунктов в сельской местности, внутривоздушных территорий, железнодорожных станций, подъездных путей промышленных предприятий.

Съемочной основой теодолитной съемки служат, как правило, теодолитные ходы (замкнутые и разомкнутые). При необходимости сгущение съемочной сети может быть выполнено путем определения координат дополнительных точек засечками – полярной, линейной, угловой, опирающимися на пункты проложенных ранее теодолитных ходов.

Результаты измерений при съемке наносят на абрис. *Абрисом* называется схематический чертеж, масштаб которого принимается произвольным.

На абрисе показывают взаимное расположение вершин теодолитных ходов, линий и снимаемых объектов со всеми числовыми результатами измерений и пояснительными записями (рис. 11.3). Абрис ведется в карандаше четко и аккуратно. Он является основным документом съемки и служит материалом для составления плана местности.

Съемка ситуации заключается в определении положения характерных точек контуров и местных предметов относительно вершин и сторон теодолитного хода. Она может выполняться одновременно с прокладкой теодолитного хода либо независимо. В зависимости от характера местности и расположения контуров относительно теодолитных ходов применяют тот или иной способ съемки ситуации.

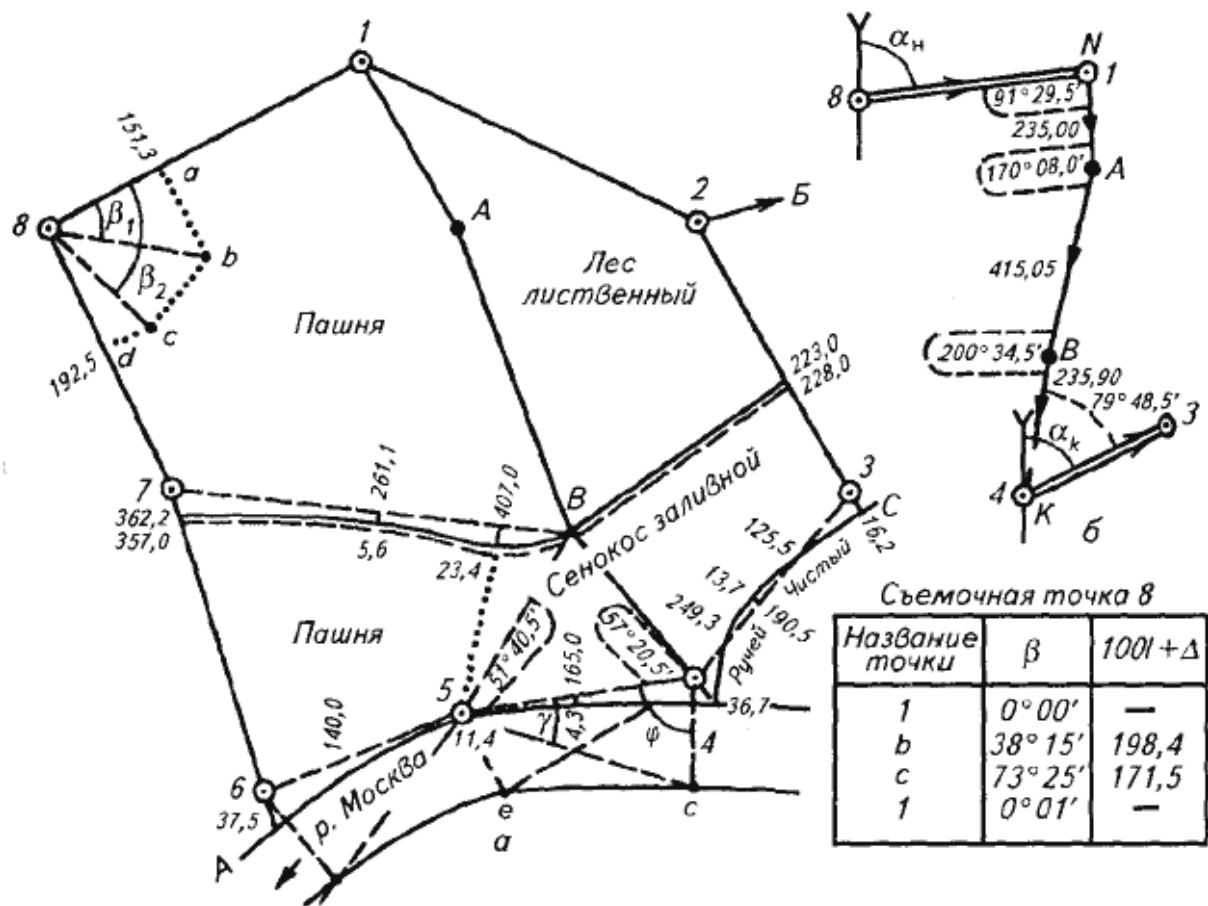


Рис. 11.3. Пример абриса теодолитной съемки

11.3.1. Способы съемки ситуации

Способ прямоугольных координат обычно применяют при съемке объектов с четкими контурами. Так, при съемке здания (рис. 11.4, а) из каждой характерной точки его контура на сторону теодолитного хода опускают перпендикуляр и измеряют расстояние по стороне хода до основания перпендикуляра (координата x) и длину перпендикуляра (координата y). Расстояния измеряют рулеткой или лентой. Для контроля выполняют обмер здания.

При построении перпендикуляров длиной более 8 м пользуются *экером*. Экер (рис. 11.5, а) имеет два зеркала 3 и 4, расположенных под углом $\delta = 45^\circ$. Луч, падающий на одно из зеркал, после двойного отражения выходит под прямым углом γ к исходному направлению. Действительно (рис. 11.5, б)

$$\begin{aligned} \gamma &= 180^\circ - (\omega + \varepsilon) = 180^\circ - [(180^\circ - 2\alpha) + (180^\circ - 2\beta)] = \\ &= 180^\circ - 360^\circ + 2 \cdot (\alpha + \beta) = 180^\circ - 2 \cdot [180^\circ - (\alpha + \beta)] = 180^\circ - 2\delta. \end{aligned}$$

Следовательно, при $\delta = 45^\circ$ имеем $\gamma = 90^\circ$.

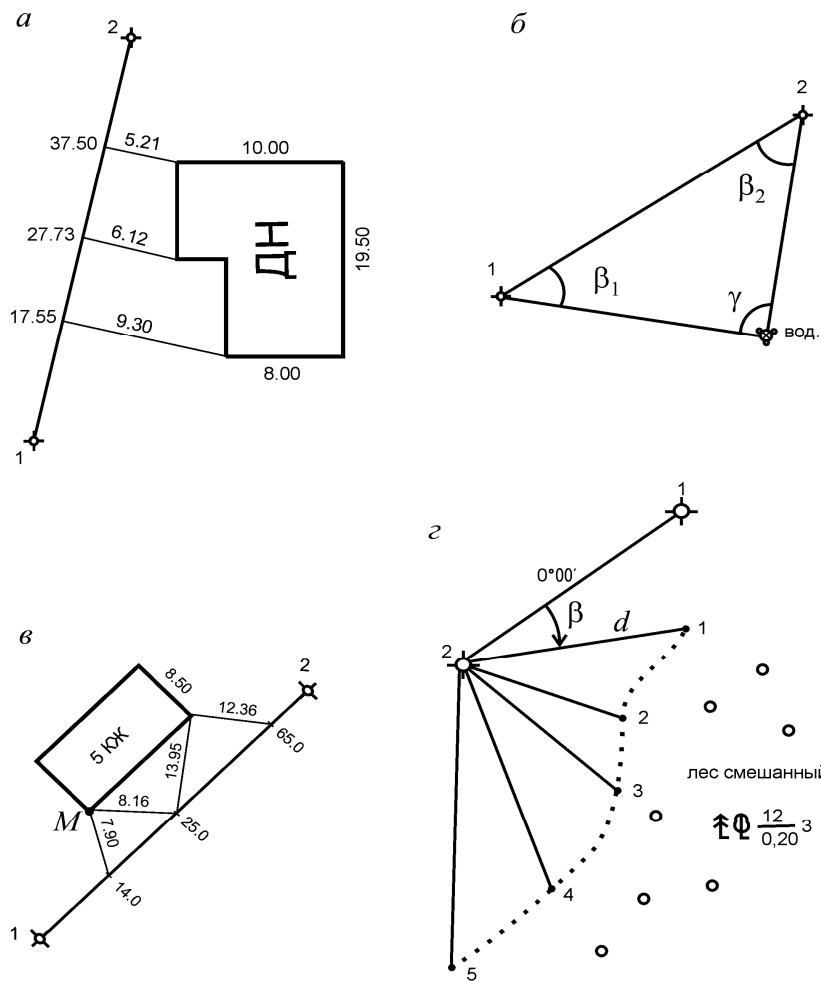


Рис. 11.4. Способы съемки ситуации: *а* – прямоугольных координат; *б* – угловой засечки; *в* – линейной засечки; *г* – полярных координат

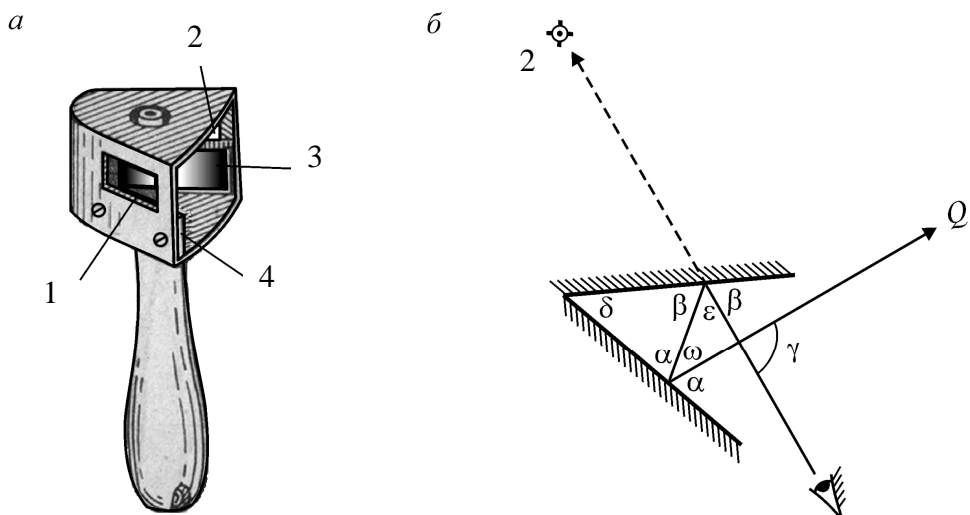


Рис. 11.5:
а – двухзеркальный экер: 1, 2 – окна; 3, 4 – зеркала;
б – ход лучей в двухзеркальном экере: 2 – пункт съемочной сети; *Q* – направление перпендикуляра

Экер позволяет находить на стороне теодолитного хода 1 – 2 (см. рис. 11.4, а) точку, в которой линия хода и направление на съемочный пикет (угол здания) взаимно перпендикулярны. В этой точке в окне экера 2 (см. рис. 11.5, а) видна веха, установленная на пункте теодолитного хода, а под ней в зеркале – изображение угла здания.

Способ угловой засечки применяют при съемке удаленных или недоступных объектов. Так, для определения положения центра водонапорной башни (см. рис. 11.4, б) на пунктах съемочной сети 1 и 2 теодолитом измеряют горизонтальные углы β_1 и β_2 . Наилучший угол γ для засечки – 90° . Практически угол γ должен быть в пределах от 30° до 150° .

Способ линейной засечки (рис. 11.4, в). Положение точки M определяют, измеряя расстояния до точек, положение которых известно. Способ удобен, когда расстояния не превышают длины применяемого мерного прибора.

Способ полярных координат (рис. 11.4, г). Для определения положения точки 1 измеряют горизонтальный угол β и расстояние d .

Результаты выполненных в ходе съемки измерений записывают в полевой журнал. Одновременно составляют *абрис* – схематический чертеж, на котором в произвольном масштабе показывают расположение пунктов съемочной сети и снимаемых объектов, характеристики снимаемых объектов и результаты измерений.

11.3.2. Построение плана теодолитной съемки

Составление плана выполняют в следующем порядке:

1. Вычисляют координаты пунктов съемочной основы (вершин теодолитных ходов и точек, полученных засечками).
2. Разбивают на планшете сетку прямоугольных координат и оцифровывают ее.
3. Наносят на план пункты съемочной сети.
4. Наносят на план съемочные пикеты и вычерчивают контуры.
5. Оформляют план в соответствии с руководством «Условные знаки» [15].

Построение координатной сетки

Координатную сетку строят для повышения точности составления плана, удобства пользования планом при проектировании и перенесении проекта в натуре. Стороны квадратов координатной сетки принимают равными 10 см. От точности построения координатной сетки зависит точность

плана. Для построения взаимно перпендикулярных линий координатной сетки нельзя применять даже проверенный прямоугольный треугольник.

Существует много способов построения координатной сетки, которые применяют в зависимости от размеров планов и возможностей, имеющих у исполнителя.

При небольших размерах планов координатную сетку можно построить при помощи *циркуля-измерителя* и масштабной линейки по способу, известному из геометрии (рис. 11.6). Одну из осей координат или линию, параллельную оси координат, например, линию с абсциссой $x = +1500$, проводят с помощью металлической линейки, а ось абсцисс строят перпендикулярно к ней в точке A . Так как точка A находится близко к краю листа (всего 10 см), то для удобства построения перпендикуляра к линии с абсциссой $+1500$ от точки A откладывают влево 10 см и в полученной точке B строят перпендикуляр.

Для построения перпендикуляра от точки B откладывают влево еще 10 см и из полученной точки C с произвольным раствором измерителя, но большим, чем BC , проводят дуги по обе стороны линии AC . Этим же раствором измерителя проводят дуги и из точки A . Получив пересечения дуг в точках D и E , через них проводят линию, которая должна пройти через точку B без заметных для глаза отклонений, что служит контролем правильности построения перпендикуляра. Теперь от точки B по обе стороны линии DE откладывают по 10 см и получают точки F и G . Из точки F раствором измерителя, равным 10 см, проводят дуги по обе стороны линии ED . Эти дуги засекают тем же раствором измерителя из точек A и C и в пересечении получают точки H и J . Далее из точек A и C раствором измерителя 10 см проводят дуги вниз от линии AC и засекают их тем же раствором измерителя из точки G . В пересечениях дуг получают точки K и L .

Контролем правильности построения квадратов служит то, что линия HJ должна проходить через точку F , линия KL – через точку G , линия HK – через точку A , линия JL – через точку C

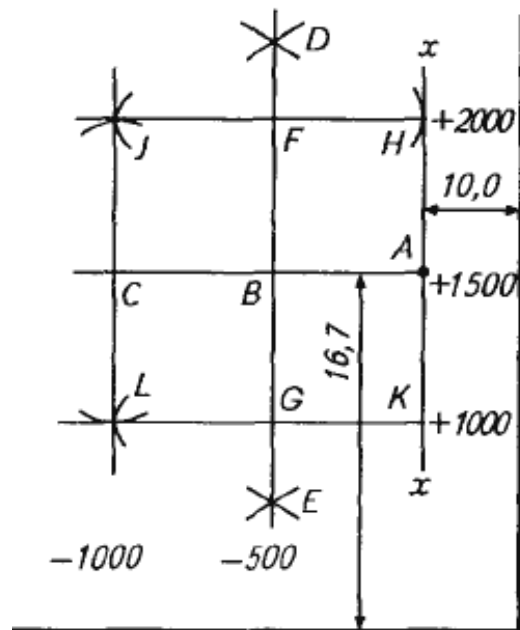


Рис. 11.6. Построение координатной сетки циркулем-измерителем

без заметных для глаза отклонений. После построения квадратов при помощи измерителя проверяют все диагонали, которые должны быть равны 14,14 см или отличаться от этого значения не более чем на 0,02 см.

Если размеры плана требуют увеличения числа квадратов координатной сетки, то последующие квадраты строят в том же порядке. После построения координатной сетки ее линии подписывают, как показано на рис. 11.6.

Координатные сетки 50×50 см удобно строить с помощью *линейки Дробышева* (рис. 11.7, а) – металлической линейки, одно ребро которой скошено для прочерчивания линий; вдоль линейки вырезаны шесть окошек со скошенными краями.

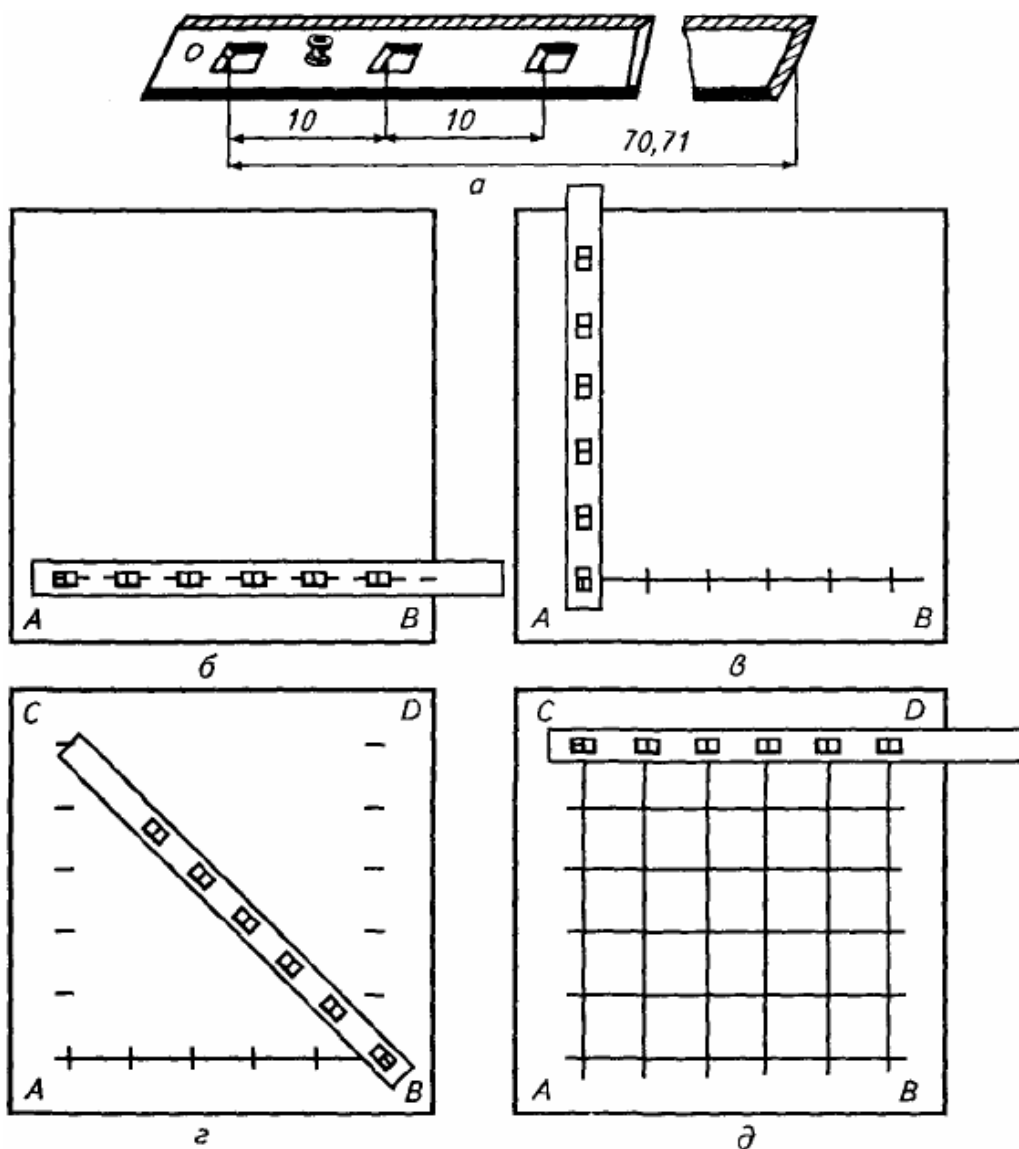


Рис. 11.7. Построение координатной сетки линейкой Дробышева

На скошенном крае первого (левого) окошка нанесен начальный штрих 0. Все скошенные края других окошек представляют дуги следующих радиусов: второе окошко 10, третье – 20 см и т. д., причем центр дуг совпадает с концом штриха 0. Линейка оканчивается скошенным ребром, представляющим дугу радиусом 70,71 см, с центром в конце штриха 0. Значение 70,71 см равно диагонали квадрата со стороной 50 см. Построение координатной сетки линейкой Дробышева выполняют так. Найдя точку *A* пересечения линий координатной сетки в левом нижнем углу (рис. 11.7, б), вдоль скошенного ребра линейки Дробышева проводят линию *AB*. Накладывают на эту линию линейку, совместив конец штриха 0 с точкой *A*, и карандашом по скошенным краям окошек проводят дуги. Кладут линейку перпендикулярно к линии *AB*, совместив конец штриха 0 с точкой *A*, и также карандашом проводят дуги по скошенным краям окошек (рис. 11.7, в). Затем, совместив конец штриха 0 с точкой *B* (рис. 11.7, г), засекают дугообразным концом линейки дугу *C* и получают левую верхнюю вершину квадрата. Аналогично получают и верхнюю правую вершину квадрата *D*. Для контроля совмещают конец штриха 0 с точкой *C* и смотрят, проходит ли дуга шестого окошка через точку *D* (рис. 11.7, д). Если проходит, то через все скошенные края окошек проводят дуги, а затем по скошенному краю линейки проводят все линии координатной сетки.

Построение координатной сетки линейкой Дробышева можно также начинать от диагонали, засекая углы квадрата его сторонами по 50 см.

Линейкой Дробышева по описанному способу можно строить координатную сетку размером 30×40 см с диагональю прямоугольника 50 см (по свойству египетского треугольника).

После построения координатной сетки ее проверяют при помощи *контрольного метра*, представляющего собой линейку таврового сечения, на скошенном крае которого нанесены штрихи через 0,2 мм. Для отсчета делений вдоль линейки имеются передвигающиеся лупы. При контроле проверяют все стороны квадратов сетки и все их диагонали. Если расхождение против точных размеров сторон квадратов и диагоналей превышает 0,2 мм, то координатная сетка должна быть построена заново.

При отсутствии контрольного метра применяют циркуль-измеритель и масштабную линейку.

Координатные сетки строят также при помощи *координатографов*. Они бывают *полевые*, которыми сетки строят в экспедиционных условиях, и *стационарные*, устанавливаемые обычно в цехах крупных геодезических

и картографических предприятий. При помощи координатографов одновременно с построением координатной сетки можно по координатам нанести точки на план.

Точность построения вершин квадратов координатной сетки и нанесения точек по координатам при помощи координатографа равна 0,05 мм.

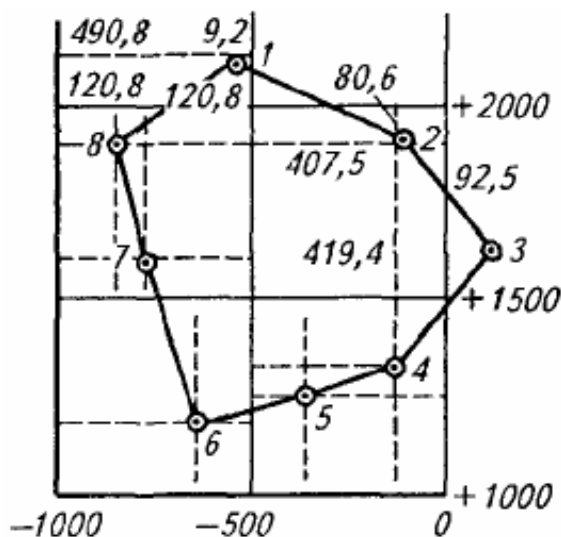
Нанесение точек на план по координатам

Для нанесения точек на план по координатам используют координатную сетку. Проследим это на примере точек 1 и 2 полигона на рис. 11.8.

$$X_1 = 2120,8, \quad Y_1 = -509,25$$

$$X_2 = 1919,39, \quad Y_2 = -92,54$$

Судя по координатам, точка 1 лежит выше левого верхнего квадрата на $+2120,8 - (+2000) = +120,8$ м. Для нанесения ее на план от линии координатной сетки $x = +2000$ по



обеим сторонам квадрата измерителем откладывают вверх 120,8 м и проводят линию, на которой лежит точка 1. Далее от правой стороны квадрата влево откладывают по этой линии $-509,2 - (-500) = -9,2$ м и контролируют дополнением до 500 м, т. е. от левой стороны квадрата вправо откладывают расстояние 490,8 м. Если эти два отложенных расстояния дают одну и ту же точку, то ее накалывают и обводят кружком диаметром 2 мм.

Рис. 11.8. Нанесение точек на план по координатам

Точка 2 попадает в верхний правый квадрат. Для ее построения от линии $+1500$ по обеим сторонам квадрата отмеряют $+1919,4 - (+1500) = +419,4$ м, контролируют дополнением до 500 м, т. е. отложением расстояния 80,6 м, и проводят линию, на которой будет лежать точка 2. Затем от оси абсцисс откладывают на этой линии $-92,5$ м и контролируют дополнением до 500 м, т. е. расстоянием 407,5 м.

Положение точек 1 и 2 контролируют горизонтальным проложением линии 1 – 2, которое (462,8 м) берут в раствор измерителя по масштабной линейке и сличают его с расстоянием между точками 1 и 2 на плане. Расхождение не должно превышать 0,2 мм.

Нанесение ситуации на план

Ситуацию на план наносят после нанесения точек теодолитных полигонов (ходов).

В зависимости от способа съемки контуров ситуации применяют соответствующие способы их нанесения на план. Материалом для нанесения ситуации являются полевые журналы и абрисы.

Если съемку ситуации проводили *способом прямоугольных координат* (способом перпендикуляров), то для нанесения ее на план пользуются линейкой, треугольником, измерителем и масштабной линейкой. Треугольник используют для построения перпендикуляров, расстояния до оснований которых, как и их длины, разрешается откладывать при помощи линейного масштаба.

Точки контуров ситуации, снятых *полярным способом*, наносят на план при помощи транспортира и измерителя. Для нанесения точек при помощи транспортира совмещают его центр с точкой 8 (см. рис. 11.3), устанавливают нулевой диаметр по начальному направлению (на рис. 11.3 начальное направление имеет линия 8 – 1) и от него по дуге транспортира отмечают значения углов. Затем полюс (центр транспортира) соединяют с отмеченными точками и откладывают расстояния от полюса до снятых точек в соответствии с абрисом.

У некоторых транспортиров на скошенном ребре нулевого диаметра в обе стороны от центра нанесена шкала миллиметровых делений. В этом случае те же точки наносят, вращая транспортир по ходу часовой стрелки и откладывая по шкале расстояния.

Точки, снятые *способом угловых засечек*, наносят на план также при помощи транспортира, строя углы на концах линии (базиса), а с помощью точек, снятых *способом линейных засечек* строят треугольник по трем известным сторонам, одна из которых является базисом, а две другие берут в раствор циркуля и в пересечении дуг, описанных с концов базиса, получают положение снятой точки.

Нанесение точек, снятых *способом створов*, объяснений не требует.

В процессе нанесения точек на план каждую последующую точку данного контура соединяют прямой линией (сплошной или пунктирной в соответствии с условными знаками) с предыдущей согласно абрису, при этом внимательно изучают абрис, чтобы не пропустить точки. Если форма контура, получившаяся на плане, вызывает у исполнителя сомнение в правильности съемки (например, прямоугольные контуры получаются на плане косоугольными), то необходимо на местности провести контрольные измерения, зачеркнуть неправильные результаты измерений, надписать правильные, указать дату исправления и фамилию исправившего абрис.

11.4. Тахеометрическая съемка

Тахеометрическая съемка используется при создании топографических планов небольших территорий в масштабах 1:500 – 1:5000, когда применение других методов неэффективно, ее часто используют для съемки полосы линейных сооружений; трубопроводов, дорог, каналов и т. п. При съемке в масштабе 1:500 линии в тахеометрических ходах измеряют лентой.

При тахеометрической съемке определяют плановое и высотное положение точек местности относительно пунктов съемочного обоснования. Плановое положение определяют полярным способом, а высотное – тригонометрическим нивелированием, при этом расстояние измеряют нитяным дальномером, горизонтальные углы – относительно опорных линий, вертикальные – относительно горизонтальной плоскости, все измерения выполняют при одной установке рейки, что ускоряет выполнение съемки (тахеометрия в переводе – быстрые измерения). Расстояние от точек тахеометрических ходов (съемочных станций) до пикетов и расстояния между пикетами не должно превышать допусков, приведенных в табл. 11.3 [13].

Таблица 11.3

Масштаб съемки	Сечение рельефа, м	Максимальное расстояние между пикетами, м	Максимальное расстояние от прибора до рейки при съемке рельефа, м	Максимальное расстояние от прибора до рейки при съемке контуров, м
1:5000	0,5	60	250	150
	1,0	80	300	150
	2,0	100	350	150
	5,0	120	350	150
1:2000	0,5	40	200	100
	1,0	40	250	100
	2,0	50	250	100
1:1000	0,5	20	150	80
	1,0	30	200	80
1:500	0,5	15	100	60
	1,0	15	150	60

11.4.1. Полевые работы при тахеометрической съемке

На этапе рекогносцировки производится осмотр местности, подлежащей съемке, выявляются ее особенности, степень застроенности, мешающие съемке факторы. В пределах заданного участка съемки должны

быть сняты все объекты ситуации, выражающиеся в заданном масштабе плана и предусмотренные условными знаками.

Высотные пикеты, необходимые для изображения рельефа на плане, должны располагаться на характерных точках и линиях рельефа местности. Из *характерных точек* выделяют положительные (вершина – точка 5 и т. п. на рис. 11.9.), отрицательные (дно котловины и т. п.), нулевые, или точки перегиба (плечевые – 3, локтевые – 4 и т. п.).

Из *характерных линий* выделяют водораздел (точки 1 – 5 на рис. 11.9), тальвег (точки 7, 8, 15), бровку и подошву (точки 13 – 18).

Также пикетированию для адекватного отображения рельефа подлежат перегибы скатов, переход одной формы рельефа в другую, урезы воды в реках, ручьях, озерах, прудах, по правилу, как показано на рис. 11.9.

Пикеты, расположенные на таких объектах ситуации, как мосты, плотины, шлюзы, пересечения дорог, колодцы, заметные строения, одновременно являются ситуационными и высотными.

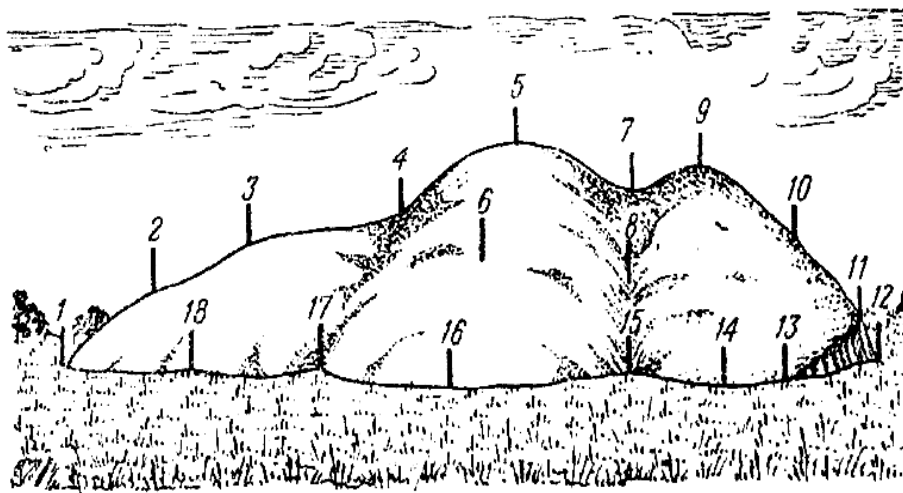


Рис. 11.9. Пример расположения высотных пикетов при тахеометрической съемке

Еще одно требование к высотным пикетам – это их густота, которая зависит:

- от характера рельефа;
- масштаба съемки;
- назначения съемки;
- принятой высоты сечения $h_{сеч.}$ рельефа.

Очевидно, чем расчлененнее рельеф, чем крупнее масштаб, чем меньше высота сечения $h_{сеч.}$ рельефа, тем чаще должны располагаться высотные пикеты.

Для выполнения съемки теодолит либо тахеометр устанавливают на точке съемочной сети (на рис. 11.10, точка A), центрируют и горизонтируют. Измеряют высоту прибора i над центром пункта.

Ориентируют горизонтальный круг, т. е. устанавливают его в такое положение, чтобы при трубе, направленной по стороне хода AB , отсчет по горизонтальному кругу был равен $0^\circ 00'$.

Определяют M_0 вертикального круга.

Реечник устанавливает рейку на пикете 1 (рис. 11.10). Наблюдатель наводит трубу прибора на рейку, читает по рейке высоту точки наведения V и берет отсчеты: по нитяному дальномеру (расстояние D_1), по горизонтальному кругу (угол β_1), по вертикальному кругу (отсчет L (лево) или Π (право)).

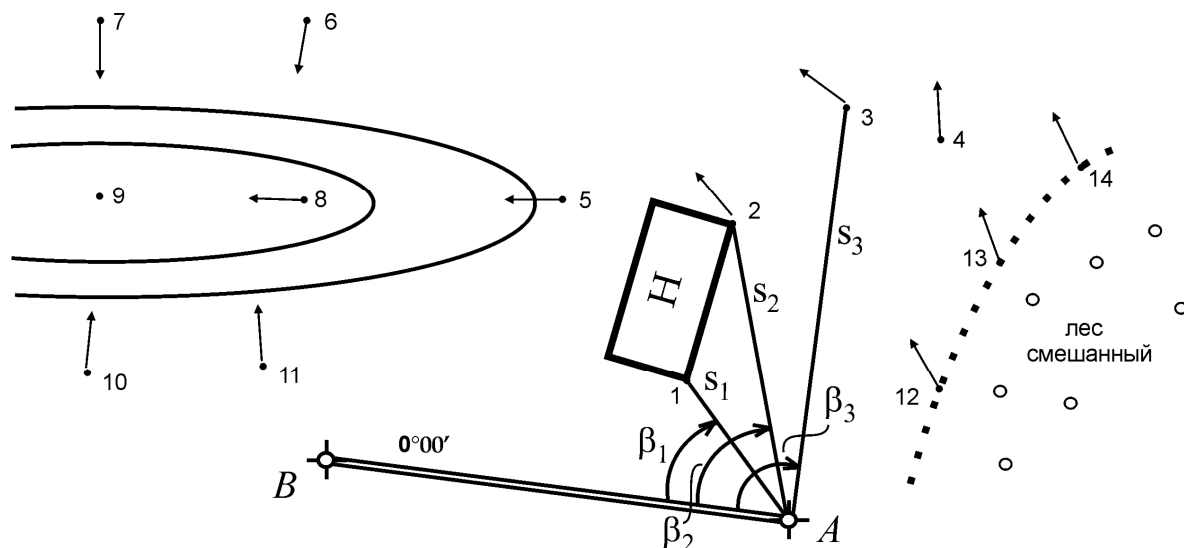


Рис. 11.10. Абрис тахеометрической съемки

Помощник наблюдателя записывает результаты измерений в полевой журнал (табл. 11.4). Реечник переносит рейку на следующие пикеты (2, 3, ...), а наблюдатель вновь выполняет наведения и отсчеты.

Параллельно с пикетным журналом на каждой станции ведутся *абрисы* (кроки) – сделанные от руки схематичные чертежи снимаемых участков местности (см. рис. 11.10). На абрисах показываются опорные геодезические пункты, пикеты, объекты ситуации, характерные точки и линии рельефа местности, дополненные в необходимых случаях схематическими горизонталями, направления скатов местности. У пунктов и пикетов выписываются их номера, причем нумерация пикетов ведется сплошная в пределах всей снимаемой территории. Заполняющие контурные условные знаки заменяются пояснительными надписями.

Таблица 11.4

№ точек	Расстояние по рейке D' , м	Высота наведения V	Отсчеты				Углы наклона ν		Исправленные расстояния S , м	Превышения h , м		Отметки H , м
			горизонтальный круг		вертикальный круг		°	'		±	значение	
			0	'	±	0						
Круг <u>КЛ</u> Станция <u>А</u> Ориентировка на станцию <u>В</u> $i = 1,49$ $M0 = +1'$ $N_{ст.} = 117,68$ м												
1	42,0	1,49	115	50	+	0	17					
2	68,4	-/-	184	30	-	1	06					
3	89,6	Г	330	20		1,52						
4	77,0	Г	350	10		0,46						
Круг <u>КЛ</u> Станция <u>С</u> Ориентировка на станцию <u>А</u> $i = 1,52$ $M0 = -1'$ $N_{ст.} = 119,73$ м												
11	178,2	-/-	161	30	+	0	55					
12	134,8	К	221	30		-						
13	133,2	1,52	244	30	+	1	18					
14	57,3	К	244	40		-						
15	43,8	2,9	311	50	+	4	21					

11.4.2. Камеральные работы

Обработка результатов измерений выполняется по формулам:

– вычисление углов наклона в зависимости от типа используемого прибора. Например, для теодолита 2Т30:

$$\nu = Л - М0 \text{ или } \nu = М0 - П;$$

– вычисление горизонтальных расстояний

$$S = D \cdot \cos^2 \nu;$$

– вычисление превышений

$$h = 1/2 D \cdot \sin(2\nu) + i - V$$

или

$$h = S \cdot \operatorname{tg} \nu + i - V;$$

– при визировании горизонтальным лучом

$$h = i - a,$$

где a – отсчет по рейке;

– вычисление высоты съёмочных пикетов

$$H_{\text{п}} = H_{\text{ст}} + h,$$

где $H_{\text{ст}}$ – высота точки стояния прибора.

Составление плана местности включает:

- разбивку на планшете координатной сетки;
- нанесение на план опорных точек хода по координатам x, y ;
- нанесение пикетных точек и рисовку контуров, используя записи в журнале и абрис;
- рисовку горизонталей с заданной высотой сечения рельефа с использованием вычисленных высот точек и абриса;
- оформление плана.

Построение координатной сетки и нанесение на план опорных точек выполняют по тем же правилам и теми же методами, что и при теодолитной съёмке.

Нанесение пикетных точек производится в соответствии с абрисами постанционно полярным способом с помощью кругового транспортира и масштабной линейки или *тахеографом*.

Тахеограф (рис. 11.11) представляет собой круговой транспортир с линейкой из прозрачного материала (целлулоида), по окружности которого нанесены деления через $30'$, причем оцифровка делений выполнена против хода часовой стрелки. Вдоль нулевого радиуса расположена миллиметровая шкала линейки с начальным штрихом в центре круга, в котором закреплена игла.

Для нанесения речной точки центр круга тахеографа совмещают с точкой станции на плане. Затем поворотом диска совмещают начальное направление на плане с отсчетом, равным полярному углу на съемочную точку. По линейке откладывают в масштабе плана соответствующее полярное расстояние и накалывают точку. Около нанесенных на план речных точек подписывают их номера и отметки. Согласно абрису и примечаниям в полевых журналах вычерчивают контуры и предметы местности. По отметкам речных точек, пользуясь методом графического интерполирования проводят горизонтали.

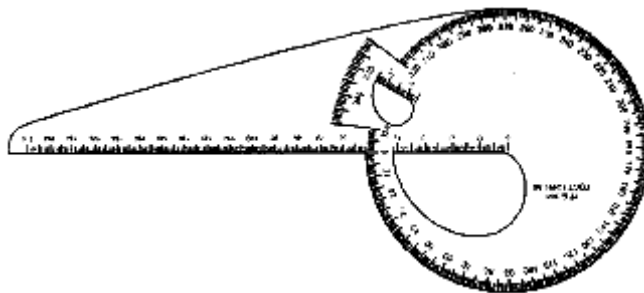


Рис. 11.11. Тахеограф

Наиболее распространены способы графической интерполяции при помощи треугольника и линейки с миллиметровой шкалой и при помощи палетки.

В способе интерполирования при помощи треугольника и линейки градуируют деления линейки в зависимости от сечения рельефа. Например, для сечения в 0,5 м можно принять 1 мм шкалы – 0,1 м сечения. Тогда 1 см шкалы составит 1 м сечения и т. д. Приставляют линейку и угольник к одной из точек с учетом выполненной градуировки. Двигают угольник вдоль линейки с поворотом линейки вокруг начальной точки до тех пор, пока сторона угольника с прямым углом не попадет на вторую точку линии интерполяции (рис. 11.12). Двигая угольник по линейке через сантиметр (только при градуировке в 1 мм – 0,1 м), отмечаем стороной угольника на линии положения точек, соответствующих горизонталям, кратным метру. Возможны другие схемы использования линейки и угольника.

Например (см. рис. 11.12), начальная точка *A* имеет высоту 167,4, конечная точка *B* – 170,9. Учитывая, что для линейки 1 мм соответствует 0,1 м высоты (1 см – 1 м высоты), примем, что до 6 см линейки будет 166 м высоты. Тогда 7 см – 167 м, 8 – 168 м, ..., 10 см – 170 м высоты и т. д. Приложим линейку делением 7,4 см (высота 167,4 м) к точке *A*, а угольник (прямой угол в сторону точки *A*) к делению 10,9 см (высота 170,9 м). Вращаем вместе линейку и угольник вокруг точки *A*, до тех пор, пока ребро прямого угла не попадет на точку *B*. Сдвигая вдоль линейки угольник на деление 10 см, отмечаем на линии *AB* точку, соответствующую горизонтали 170 м, 9 – 169 м, и т. д.

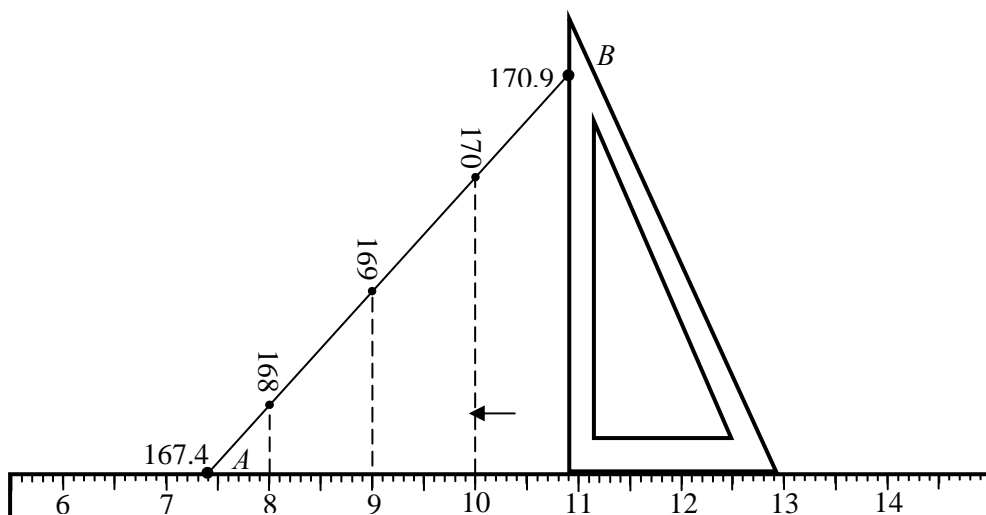


Рис. 11.12. Пример интерполяции с помощью линейки и угольника

При интерполяции с помощью палетки из кальки готовят палетку, разбивая ее параллельными линиями через равные промежутки и оцифровывая через высоту сечения таким образом, чтобы все высоты помещались между линиями. Фиксируют одну из точек на палетке и соединяют ее с соответствующей точкой на линии интерполяции. Вращают палетку вокруг этой точки до тех пор, пока конечная точка линии не попадет на линию палетки, соответствующую ее высоте. Точки пересечения линии интерполирования с точками палетки, кратные сечению рельефа, перекальывают измерителем на линию (рис. 11.13).

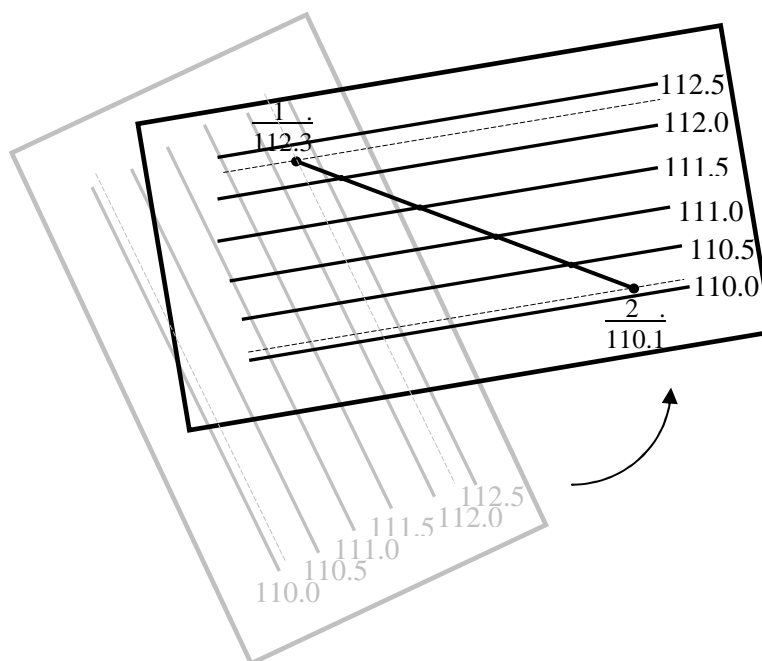


Рис. 11.13. Пример интерполяции с помощью палетки

При вычерчивании горизонталей необходимо учесть следующие требования:

- перегибы горизонталей должны находиться на скелетных линиях рельефа;
- горизонтали должны в общем следовать очертаниям таких объектов ситуации, как озера, реки, болота и т. д.;
- горизонтали обрываются при пересечении с искусственными сооружениями (спланированные площадки, строения, улицы, площади, дороги и т. д.);
- при расстояниях между горизонталями, больше 2 см, обязательно проводятся полугоризонтали.

Оформление плана. Плановые контура (ситуация) оформляются в условных знаках, как и при теодолитной съемке. Некоторые особенности имеются при оформлении высотной составляющей плана в виде горизонталей. Горизонтали, отстоящие одна от другой на высоту сечения рельефа, называют *основными*. Для изображения деталей рельефа, не выражающихся основными горизонталями, применяются *дополнительные* горизонтали, проводимые через половину основного сечения при расстоянии между основными горизонталями не менее 2 см (полугоризонтали). Если уклон местности превосходит 50° (или расстояние между горизонталями порядка графической точности в 0,2 мм от масштаба), то участок считается отвесным и отображается условным знаком обрыва. Для удобства использования горизонталей каждую пятую основную горизонталь вычерчивают утолщенной линией, на ней ставят указатели направления скатов (*бергитрихи*) и подписывают значения горизонталей. Подписи располагают в местах, удобных для чтения, но так, чтобы верх цифры был обращен в сторону повышения ската.

11.4.3. Автоматизация тахеометрической съемки

Использование электронных тахеометров, регистрирующих результаты измерений на магнитные носители, и программных продуктов при обработке результатов измерений позволяет автоматизировать процесс составления плана.

При съемке местности электронный тахеометр устанавливают на точке съемочной основы, вводят в память координаты и высоту точки стояния, высоту прибора и отражателя, температуру воздуха и атмосферное давление. Наведя трубу на соседнюю точку хода, устанавливают отсчет по горизонтальному кругу, равный $0^\circ 00'$.

Реечник ставит вежу с отражателем поочередно на съемочных пикетах. Тахеометром измеряют горизонтальный и вертикальный углы и рас-

стояние до отражателя. Горизонтальный угол и вычисленные по результатам измерений горизонтальное расстояние d , превышение h и высота пикета H высвечиваются на табло и регистрируются в памяти прибора. Предусмотрена возможность отображения и регистрации иных данных.

Собранную информацию экспортируют в память компьютера и обрабатывают, используя такие пакеты программ, как «CREDO», «Топаз» и др. При этом получают электронную версию топографического плана. При необходимости ее можно распечатать на плоттере и получить план на бумаге.

11.5. Сканерная съемка

Лазерный сканер – прибор, предназначенный для автоматического определения пространственных координат множества точек, расположенных на поверхности объекта съемки (рис. 11.14).

Сканер излучает лазерный луч, который, отразившись от поверхности объекта, возвращается к прибору. По времени прохождения сигнала, как и в светодальномере, определяется расстояние до точки отражения.

Шаговый двигатель прибора системой зеркал изменяет направление лазерного луча. По углам поворота зеркал и измеренному расстоянию вычисляются трехмерные координаты точки.



Рис. 11.14. Лазерный сканер

Интерфейсным кабелем сканер соединен с компьютером, который по установленной программе управляет работой сканера и обрабатывает результаты измерений.

При выполнении съемки поверхность объекта покрывается «облаком точек», т. е. множеством точек, плотность которых может задаваться в пределах от долей миллиметра до нескольких сантиметров. В результате обработки измерений получают трехмерную модель объекта. Эту модель можно рассматривать на экране компьютера под разными углами зрения и в разных проекциях, а также выполнять на ней обмер интересующих частей объекта съемки.

Ограниченное поле зрения сканера и форма объекта съемки обычно не позволяют выполнить съемку всего объекта с одной установки сканера. Поэтому сканирование выполняют из нескольких позиций сканера, покрывая объект «облаком точек» по частям. При этом

части облака должны иметь перекрытия, т. е. общие точки, что дает возможность «сшивать» эти части в одно целое. Такими общими точками служат характерные, особенно четкие точки объекта или специальные мишени, устанавливаемые перед съемкой на объекте. При необходимости центры мишеней геодезическими измерениями привязывают к существующей геодезической сети. Такой привязкой обеспечивается представление всей модели в единой с геодезической сетью системе координат.

Сканеры существуют разной точности. Выбор сканера зависит от характера решаемой задачи. Так, точные сканеры при расстоянии от прибора до объекта 50 м обеспечивают определение положения точек с погрешностями, не превышающими 3 – 6 мм. Сканеры с дальностью съемки 400 м и более характеризуются точностью в несколько сантиметров.

Метод лазерного сканирования применяется для оперативного составления плана участка местности, а также для съемки искусственного сооружения или фасада здания и получения их точных чертежей.

11.6. Фототопографическая съемка

Для больших территорий топографические карты и планы всех масштабов, в том числе и крупных, составляют преимущественно аэрофото-топографическим методом, сущность которого заключается в следующем. С самолета или другого воздушного носителя с определенной высоты, зависящей от масштаба съемки, местность фотографируют автоматическим аэрофотоаппаратом (АФА) при почти вертикальной его оптической оси. В результате получают снимок местности, близкий к горизонтальному. Для того чтобы снять всю необходимую площадь, делают несколько снимков, причем с перекрытием – изображение на последующем снимке перекрывает изображение на предыдущем.

Крупномасштабная аэрофотосъемка выполняется в масштабе, который в 4 – 6 раз мельче масштаба создаваемого плана, при этом стремятся, чтобы отдельные населенные пункты, городские кварталы, предприятия по возможности располагались в пределах одного аэрофотоснимка. Продольное перекрытие снимков должно составлять около 60%.

Для съемки применяют АФА с высокой разрешающей способностью, минимальными геометрическими искажениями снимаемых объектов, размерами снимков 18×18 см и 23×23 см.

Лучшее время для выполнения аэрофотосъемки – ранняя весна или поздняя осень, когда нет листьев на деревьях (меньше тени, повышается качество дешифрирования), растительный покров имеет небольшую высо-

ту или отсутствует (увеличивается точность изображения рельефа). На застроенной территории аэрофотосъемка может быть выполнена при сплошной облачности, когда тени меньше закрывают сооружения. Иногда производят две аэрофотосъемки местности: первую – крупного масштаба с небольшой высоты (300...400 м) в период, когда влияние растительного покрова на точность высотных измерений незначительно и может быть обеспечено изображение рельефа с сечением через 0,5 м, и вторую – более мелкого масштаба для составления фотопланов.

До проведения аэрофотосъемки выполняют маркирование пунктов геодезической основы, возможных опознавательных знаков, колодцев и камер подземных коммуникаций, а также других точек сооружений, координаты которых необходимо определить. Маркировочные знаки делают из недорогих, контрастных по отношению к местности материалов и придают им форму квадрата, круга, креста с размерами не менее 0,2 м на аэрофотоснимке.

Плановые опознавательные знаки обычно располагают по поперечникам (в зоне поперечных перекрытий) через 7-8 базисов. Высотные опознавательные знаки при сечении рельефа через 1 м проектируют через 3-4 базиса. При высоте сечения рельефа 0,5 м производят сплошную высотную привязку, обеспечивая каждую стереопару шестью опознавательными знаками.

Для привязки опознавательных знаков применяют геодезические методы, рекомендуемые для определения координат и высот опознавательных знаков (аналитические засечки, светодальномерную полигонометрию, триангуляционные и трилатерационные построения, теодолитные ходы; геометрическое и тригонометрическое нивелирование; спутниковые определения).

Для уточнения некоторых характеристик ситуации и рельефа, например, названий населенных пунктов и рек, этажности и материалов зданий, вида и средних размеров лесных насаждений, производят полевое обследование – дешифрирование. На застроенных территориях корректируют изображения оснований высоких сооружений, а также координируют углы капитальных зданий и сооружений, центры колодцев, стрелочных переводов и др., обмеряют габаритные размеры строений. При съемке водоемов определяют высоты уровня воды и глубины по поперечникам. Производится досъемка подземных коммуникаций и других не отобразившихся на снимках объектов.

Топографический план по снимкам создают в основном с помощью цифровых фотограмметрических систем, позволяющих выполнять все процессы преобразования снимков, а также получать цифровые модели местности (рис. 11.15).



Рис. 11.15. Аэрофотографическое изображение местности (*а*) и составленный по нему план (*б*)

Для составления планов площадок и террас в горной местности, а также при исполнительных съемках транспортных узлов, карьеров, надземных сооружений и других объектов применяют метод наземной стереофотограмметрии. В этом методе съемку производят фототеодолитом или специальными цифровыми камерами с базисов.

Базисы выбирают на возвышенных местах, чтобы с них можно было снять всю территорию без «мертвых» пространств, разрывов, излишних перекрытий и получить на плане изображение наиболее удаленных предметов и контуров местности с требуемой точностью. По возможности базисы ориентируют параллельно общему направлению снимаемого участка, чтобы хорошо просматривались элементы рельефа и ситуации. Как правило, на каждом базисе предусматривают съемку с двух станций при нормальных и равноотклоненных на угол скоса осях. Смежные стереопары снимают с перекрытием 20 – 40%.

Для составления по стереопаре топографического плана необходимо знать длину базиса фотографирования и координаты (в плане и по высоте) нескольких опознавательных знаков на местности. Стереопары обрабатывают для получения топографического плана так же, как и аэрофотоснимки, с помощью цифровых фотограмметрических систем.

Лабораторная работа № 5 ТЕОДОЛИТНАЯ СЪЕМКА

Приборы и принадлежности: калькуляторы, чертежные ватманы формата А2, циркули-измерители, геодезические транспортиры, линейки.

Литература: [8, 12, 13, 14, 15].

Задание.

1. Выполнить обработку теодолитного хода согласно п. 11.2.1 данного УМК.

2. Построить план теодолитной съемки масштаба 1:2000. Порядок действий приведен в п. 11.3.2.

Схема теодолитного хода с измеренными углами и длинами сторон и абрис теодолитной съемки приведены на рис. Л5.1.

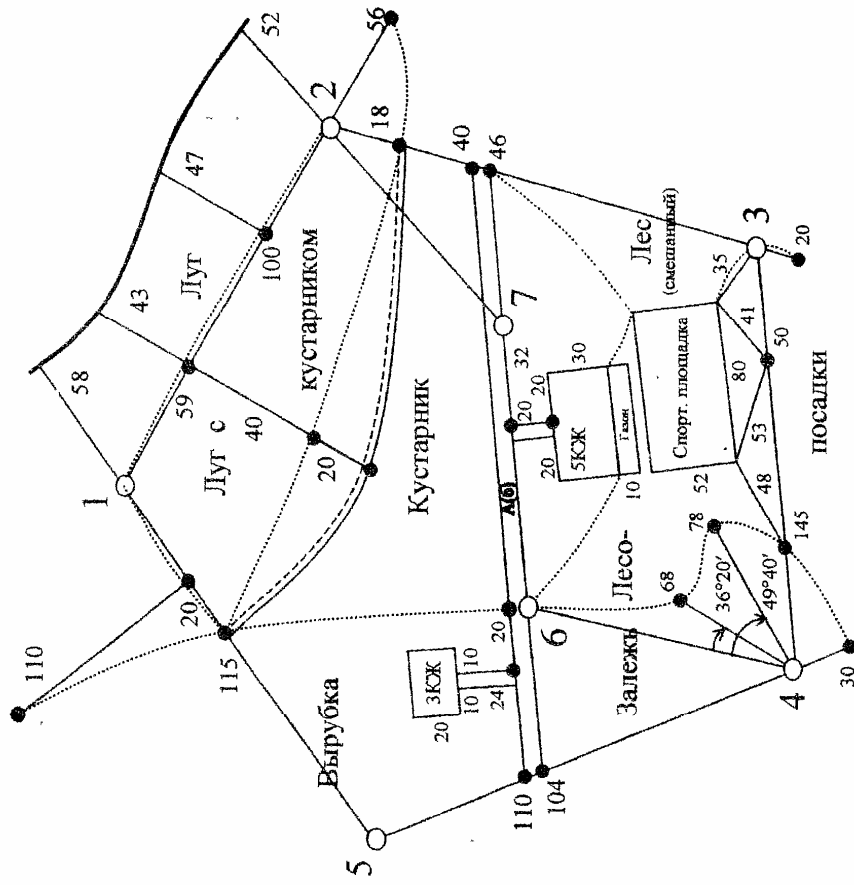
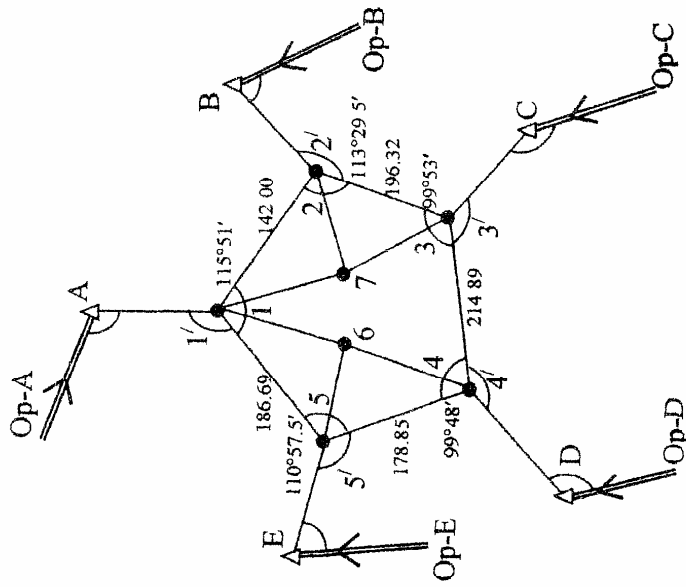
Схема определения точек 6 и 7 представлена на рис. Л5.2.

Вариант привязки полигона и привязочные элементы (дирекционный угол исходной стороны, измеренный угол на точке *A* и координаты точки *A*) задаются преподавателем.

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Пояснительную записку.
2. Схему теодолитного хода с исходными данными.
3. Схему линейно-угловых засечек.
4. Абрис теодолитной съемки.
5. Координатную ведомость.
6. План теодолитной съемки.

Построение плана геодезической съемки (1:2000)



Абрис геодезической съемки

Рис. Л5.1. Схема хода и абрис геодезической съемки

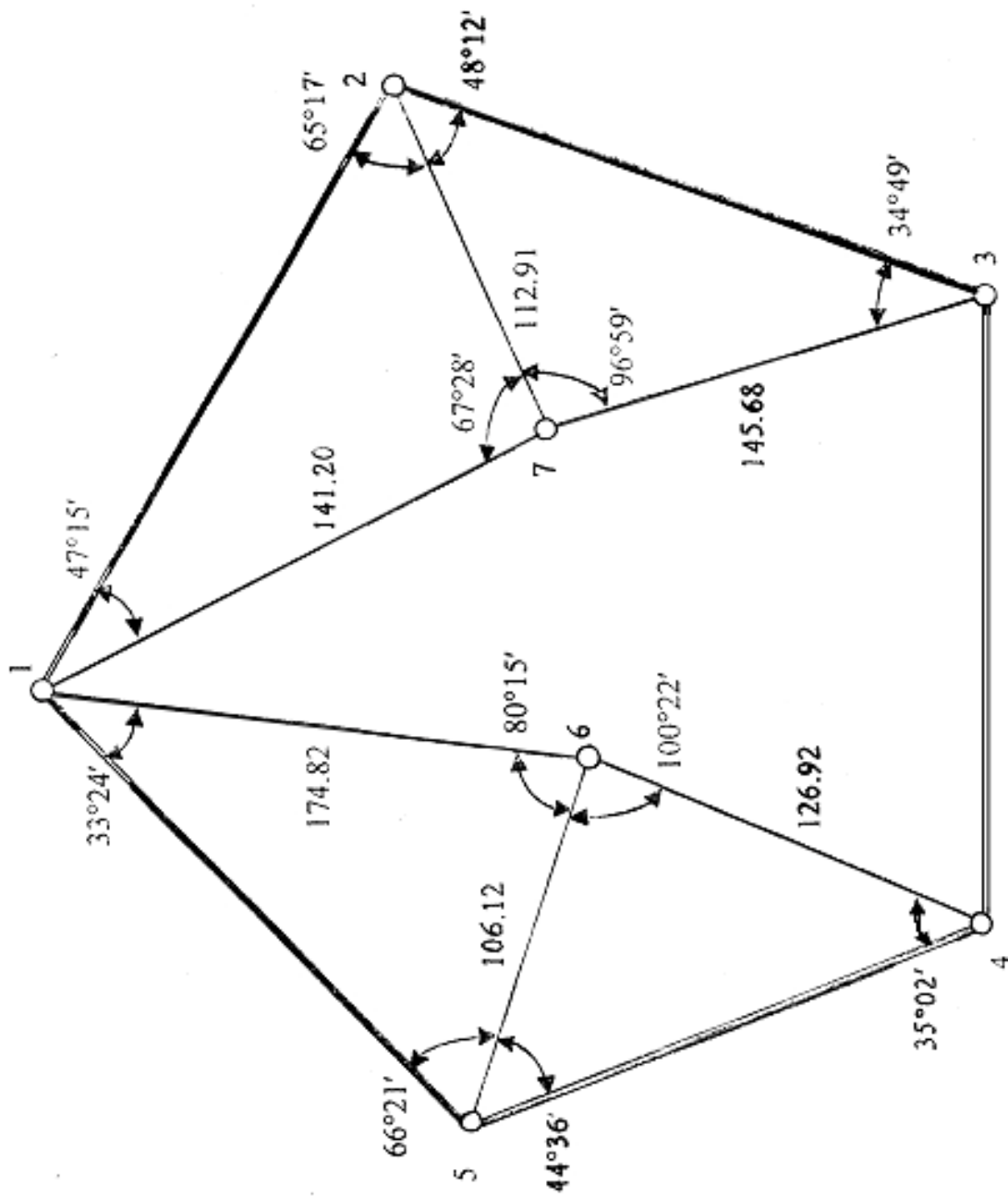


Рис. Л5.2. Данные для определения координат точек засечками

Лабораторная работа №6

ТАХЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Приборы и принадлежности: калькуляторы, чертежные ватманы формата А2, циркули-измерители, геодезические транспортиры (тахеографы), линейки.

Литература: [8, 12, 13, 14, 15].

Задание.

1. Выполнить обработку журнала тахеометрической съемки, приведенного ниже.
2. Построить план тахеометрической съемки масштаба 1:2000. Абрис тахеометрической съемки представлен на рис. Лб.1. Порядок обработки приведен в п. 11.4.2.

Съемка выполнялась с точек теодолитного хода, обработанного в предыдущей работе. Точки 6 и 7 получены линейно-угловыми засечками с точек того же теодолитного хода (рис. Л5.2).

Рекомендуется план тахеометрической съемки совместить с планом теодолитной съемки.

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1. Пояснительную записку.
2. Абрис тахеометрической съемки.
3. Журнал тахеометрической съемки.
4. План тахеометрической съемки.

Построение плана тахеометрической съемки (М 1:2000)

Фамилия, имя _____ группа _____ вариант _____

Журнал тахеометрической съемки

№ точек	расстояние по рейке D', м	высота наведения. v	Отсчеты						Углы наклона ν			исправленные расстояния D, м	Превышения h, м		Отметки H, м
			гориз. круг			верт. круг			±	o	'		$0.5 \cdot D' \cdot \sin(2\nu) + i - v$		
			o	'	±	o	'	±					значение		
КЛ Станция I Ориентировка на станцию II $i = 1.49$ MO = +1' H_I =															
1	72.0	1.49	115	47	+	0	17								
2	118.4	"	184	30	-	1	06								
3	136.2	"	213	30	-	1	17								
4	69.0	"	238	23	-	1	35								
5	185.0	"	264	10	+	0	39								
6	105.0	"	265	32	+	0	31								
7	92.0	Г	330	16			1.52								
8	67.0	Г	350	10			0.46								
КЛ Станция II Ориентировка на станцию VII $i = 1.52$ MO = -1' H_{II} =															
9	102.0	1.52	133	25	+	0	04								
10	178.2	"	161	30	+	0	55								
11	150.0	"	194	20	+	0	57								
12	70.0	"	194	56	+	0	23								
13	159.0	"	216	48	+	0	57								
14	134.8	К	221	30		-	-								
15	133.2	1.52	244	30	+	1	18								
16	56.0	К	244	35		-	-								
17	40.1	2.9	311	48	+	4	21								
КЛ Станция VII Ориентировка на станцию I $i = 1.40$ MO = 0' H_{VII} =															
18	41.1	1.40	82	11	-	0	46								
19	100.2	"	272	56	-	0	11								
20	46.3	"	276	46	-	0	14								
21	193.6	"	310	30	-	1	05								
22	38.0	3.00	359	32	+	0	26								

Теодолит 2Т30

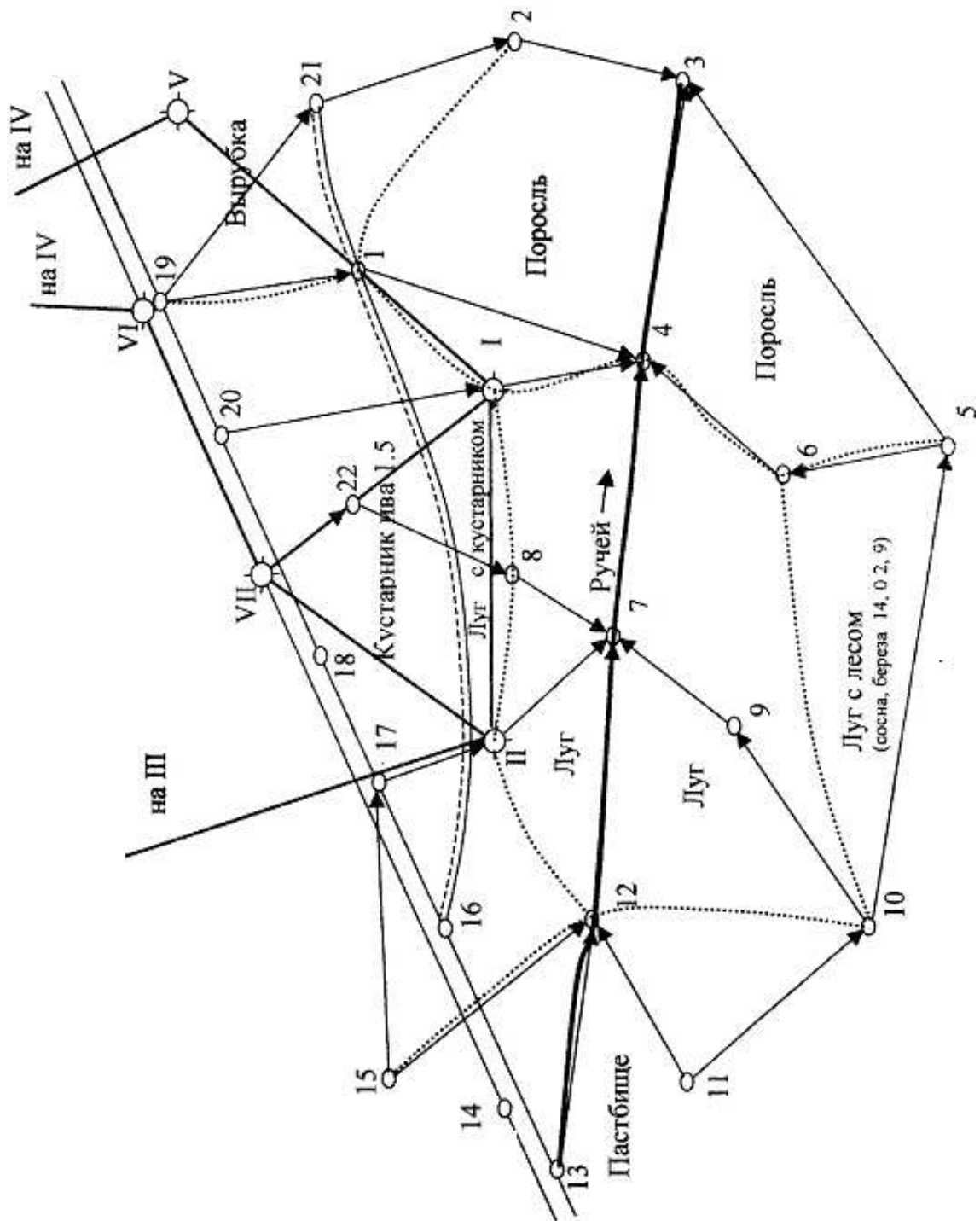


Рис. Лб.1. Абрис тахеометрической съемки

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО МОДУЛЮ 3

Тема 11. Топографические съемки

1. Какие инструменты применяют при горизонтальной съемке, какая документация составляется?
2. Назовите способы съемки ситуации.
3. Можно ли при теодолитной съемке определять расстояние по нитяному дальномеру.
4. Какие геодезические инструменты применяют при тахеометрической съемке, и какую составляют документацию?
5. Каков порядок работы на станции при тахеометрической съемке?
6. Как вычисляют превышение реечных точек относительно станции и их отметки?
7. Какие виды съемочного обоснования применяют при тахеометрической съемке?

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственная геодезическая сеть Республики Беларусь. Основные положения. – Минск: Белстандарт, 2005.
2. Захаров, А. И. Геодезические приборы / А. И. Захаров. – М.: Недра, 1989.
3. Инженерная геодезия: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. А. Визгин [и др.]; под ред. проф. Л. С. Хренова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985.
4. Инженерная геодезия: учебник для вузов / Е. Б. Ключин [и др.]; под ред. Д. Ш. Михелева. – 4 е изд., испр. – М.: Академия, 2004.
5. Инженерная геодезия: учеб. пособие / Е. С. Богомолова [и др.]; под ред. В. А. Коугия. – СПб.: С.-Петербур. гос. ун-т путей сообщения, 2006.
6. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. – М.: Недра, 1990.
7. Инструкция по проведению технологической поверки геодезических приборов. – М.: Недра, 1999.
8. Инструкция по топографическим съемкам масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. ГКИНП-02-033-82. – М.: Недра, 1982.
9. Кулешов, Д. А. Инженерная геодезия: учеб. для вузов / Д. А. Кулешов, Г. Е. Стрельников, Г. Е. Рязанцев. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1996.
10. Курс инженерной геодезии: учеб. для вузов / под ред. В. Е. Новака. – М.: Недра, 1989.
11. Куштин, И. Ф. Инженерная геодезия: учеб. / И. Ф. Куштин, В. И. Куштин. – Ростов н/Д: ФЕНИКС, 2002.
12. Лукьянов, В. Ф. Лабораторный практикум по инженерной геодезии / В. Ф. Лукьянов [и др.]. – М.: Недра, 1990.
13. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – М.: Недра, 1970.
14. Поклад, Г. Г. Геодезия: учеб. пособие для вузов / Г. Г. Поклад, С. П. Гриднев. – М.: Академический Проект, 2007.
15. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 / ГУГК при Совете Министров СССР. – М.: Недра, 1989.
16. Хейфец, Б. С. Практикум по инженерной геодезии / Б. С. Хейфец, Б. Б. Данилевич. – М.: Недра, 1979.
17. Федотов, Г. А. Инженерная геодезия: учеб. / Г. А. Федотов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2004.
18. Яковлев, В. В. Практикум по лазерным светодальномерам и электронным тахеометрам / В. В. Яковлев, Г. А. Науменко. – Ростовн/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2003.
19. Дегтярев В. М. Геодезия : учеб.-метод. комплекс. В 2 ч. Ч. 1 / В. М. Дегтярев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Новополюцк: ПГУ, 2010.

Учебное издание

ГОЛОВАНЬ Геннадий Евстафьевич
ПАРАДНЯ Петр Федорович
БОНДАРЕНКО Валентина Анатольевна

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДЕЗИЯ

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Учебно-методический комплекс
для студентов строительных специальностей

Редактор *О. П. Михайлова*
Дизайн обложки *Л. И. Вайдашевич*

Подписано в печать 07.10.2011. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 11,14. Уч.-изд. л. 9,53. Тираж 50 экз. Заказ № 1607.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.