



Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный
университет путей сообщения»



Кафедра «Изыскания и проектирование железных дорог»

Вл.А. Анисимов, С.В. Макарова

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДЕЗИЯ

Сборник лекций

Рекомендовано
методическим советом ДВГУПС
в качестве учебного пособия

Хабаровск
Издательство ДВГУПС

2009

УКД 528(075.8)
ББК Д14я73
А 674

Рецензенты:

Кафедра «Строительство железных дорог» Забайкальского
института железнодорожного транспорта – филиала ИрГУПС
(заведующий кафедрой *И.В. Благоразумов*)

Начальник инженерно-геодезической базы
дорожного центра диагностики путевого хозяйства ДВОСТЖД
А.И. Середин

Анисимов, Вл.А.

А 674 Инженерная геодезия : сб. лекций / Вл.А. Анисимов, С.В. Ма-
карова. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. – 150 с.

Сборник лекций соответствует ГОС ВПО направлений бакалаврской подготовки, подготовки дипломированных специалистов 270200 «Транспортное строительство» и 270100 «Строительство» всех специальностей по дисциплине «Инженерная геодезия».

Изложены основные сведения по геодезии, топографии, геодезическим приборам, методам геодезических измерений, вычислений и оценки точности их результатов, инженерно-геодезическому обеспечению изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Рассмотрены общие вопросы использования геоинформационных и спутниковых навигационных систем в геодезии.

Издание разработано в соответствии с программой курса инженерной геодезии для строительных специальностей и предназначено для студентов всех форм обучения.

УКД 528(075.8)
ББК Д14я73

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью подготовки студентов строительных специальностей по дисциплине «Инженерная геодезия» является овладение современными геодезическими приборами и методами выполнения геодезических работ при изысканиях, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Для этого они изучают основы инженерной геодезии и топографии, необходимые инженеру как для разработки различных проектов, так и для строительства и изучения работы инженерных сооружений.

Инженеры строительных специальностей должны:

- иметь представление о форме и размерах Земли, системах координат и высот, геодезических опорных сетях, современных тенденциях развития геодезических приборов и методов измерений, об их применении при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений;

- знать устройство геодезических приборов и методы выполнения геодезических работ при изысканиях, строительстве и эксплуатации сооружений;

- уметь пользоваться картами, планами и цифровыми моделями местности для решения инженерных задач, выполнять измерения геодезическими приборами, их математическую обработку, подготовку данных для выноса проекта в натуру и разбивочные работы сооружений.

Сборник лекций составлен на основе учебной [1, 2, 3, 4, 5, 13] и справочной [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] литературы и состоит из 18 лекций, в которых излагаются только основные разделы инженерной геодезии. Издание предназначено для самостоятельной работы студентов младших курсов строительных специальностей.

Лекция 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОДЕЗИИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

План лекции

- 1.1. Предмет геодезии и её связь с другими науками
- 1.2. Краткий исторический очерк развития российской геодезии
- 1.3. Задачи инженерной геодезии
- 1.4. Понятие о форме и размерах Земли
- 1.5. Проектирование земной поверхности. Системы координат

1.1. Предмет геодезии и её связь с другими науками

Геодезия – слово греческого происхождения, образовано из двух греческих слов **gê (гео) земля** и **daizo (дайдзо) разделяю**, что в переводе означает **землеразделение**. Такое буквальное определение геодезии говорит только лишь о том, что она является одной из древнейших наук о Земле. Возникла эта наука с началом земледелия. В процессе исторического развития содержание каждой науки непрерывно меняется, в связи с чем неизбежен разрыв между названием науки и её содержанием. Так, например, **геометрия** буквально определяется как **землеизмерение**. Однако в наше время измерения на Земле не являются предметом геометрии. Данной проблемой занимается **геодезия** – наука об измерениях на земной поверхности и в околоземном пространстве, а также о вычислениях и графических построениях, проводимых:

- для определения фигуры и размеров Земли как планеты в целом;
- исследования движения земной коры;
- изображения земной поверхности и отдельных её частей в виде планов, карт и профилей (вертикальных разрезов);
- решения разнообразных научных и практических задач по созданию и эксплуатации искусственных сооружений на земной поверхности и в околоземном пространстве;
- создания геодезических опорных сетей как основы для выполнения вышеперечисленных задач.

Таким образом, предметом геодезии является геометрическое изучение физической поверхности Земли и происходящих с ней изменений.

Поверхность Земли (рис. 1) характеризуется многообразием форм. На ней находятся всевозможные объекты естественного и искусственного происхождения, геометрическое моделирование которых имеет для человека исключительно важное значение.



Рис. 1. Физическая поверхность Земли

Проектирование, строительство и эксплуатация инженерных сооружений, планировка, озеленение и благоустройство населенных мест, изучение и добыча полезных ископаемых, сельскохозяйственное и лесное производство, обеспечение обороноспособности государств – во всех этих и многих других сферах жизнедеятельности человека приходится

решать задачи геометрического характера, связанные с поверхностью Земли. Их решение основывается на методе измерения различных величин. Данный метод является неотъемлемой частью геодезии.

В геодезии широко используют достижения астрономии, физики, математики, механики, электроники, геоморфологии и других наук.

Астрономия, изучающая Землю как одно из небесных тел, влияющих на движение других небесных тел, обеспечивает геодезию необходимыми исходными данными.

Для производства измерений на земной поверхности используют различные приборы и инструменты, в создании которых применяют научные достижения *физики, химии, механики, оптики, электроники* и других наук.

При измерении различных величин практически невозможно получить их истинное значение. В связи с этим возникает необходимость определения их вероятнейшего значения, т. е. наиболее близкого к истинному. С этой целью в геодезии применяется математическая обработка результатов измерений, в которой используются достижения *высшей математики, вычислительной техники, математической статистики, теории вероятностей, теории ошибок, теории информации*.

Для оформления результатов измерений и вычислений в геодезии применяется метод графического представления данных. Для его использования необходимо знание приемов топографического черчения. С помощью данного метода составляются чертежи, являющиеся продуктом производства геодезических работ и характеризующиеся сложной символикой, большой точностью и высоким качеством исполнения.

Тесную связь геодезия имеет также с географией, геологией и геоморфологией.

География изучает окружающие человеческое общество природные условия, размещения производства и условия его развития. Знание географии обеспечивает правильную трактовку элементов ландшафта, который включает в себя: 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.).

Геология изучает строение, минеральный состав и развитие Земли. **Геоморфология** – рельеф земной поверхности и закономерности его изменения.

Применение фотоснимков в геодезии требует знания *фотографии*.

В настоящее время в связи с широким использованием цифрового и электронного картографирования, геоинформационных и глобальных навигационных систем, дистанционного зондирования Земли аэрокосмиче-

скими средствами всё большее значение для геодезии приобретают достижения *информатики, автоматике и электроники*.

В процессе своего развития геодезия разделилась на ряд научных дисциплин: высшую геодезию, топографию, инженерную геодезию, картографию, фотограмметрию, радиогеодезию, космическую геодезию, геодезическое инструментоведение и др.

Высшая геодезия изучает форму и размеры Земли, движение её ко-ры и 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 удалённых друг от друга геодезических пунктов;
- точность изображения пунктов на плоскости в проекции с учётом искажений из-за кривизны земной поверхности.

Топография изучает методы изображения участков земной поверхности по материалам съёмочных работ и создания на их основе топографических карт и планов.

Инженерная геодезия изучает методы и способы геодезического обеспечения при разработке проектов, строительстве и эксплуатации разнообразных сооружений, а также при освоении и охране природных ресурсов.

Космическая геодезия рассматривает теорию и методы решения научных и практических задач на земной поверхности по наблюдениям небесных тел (Луна, Солнце, ИСЗ) и по наблюдениям Земли из космоса. Космическая геодезия включает в себя глобальные навигационные системы, являющиеся основой применяемых в настоящее время координатных систем, и системы космического дистанционного зондирования многоцелевого назначения, используемые для мониторинга поверхности Земли.

Предметом изучения **картографии** являются методы и способы отображения поверхности Земли и протекающих на ней процессов в виде различных образно-знаковых моделей, в том числе цифровых и электронных карт.

Фотограмметрия решает задачи измерений по аэрофото- и космическим снимкам для различных целей: создания карт и планов, проектирования и строительства сооружений, обмеров и определения площадей застроек, лесных массивов и т. п.

1.2. Краткий исторический очерк развития российской геодезии

Геодезия как наука формировалась и развивалась тысячелетиями. Древние памятники, возведенные в Египте и Китае, свидетельствуют о том, что человечество имело представление об измерениях на поверхности земли за много веков до нашей эры. Приемы измерения на земной поверхности были известны и в древней Греции, где они получили теоретическое обоснование и положили начало геометрии. Геодезия и геометрия долго взаимно дополняли и развивали одна другую.

В России первые геодезические работы, зафиксированные документально, выполнялись в XI веке при измерении князем Глебом ширины Керченского пролива между Керчью и Таманью. Начало картографии было положено составлением в XI веке карты всего Московского государства.

Интенсивное развитие геодезии в России связано с именем Петра I. В 1745 г. был издан «Первый атлас России», созданный по материалам планомерной инструментальной топографической съемки всего государства, начатой по указу Петра I в 1720 г. Первые в России астрономо-геодезические и картографические работы возглавил И.К. Кирилов.

В 1779 г. по указу Екатерины II была открыта землемерная школа, которая в 1819 г. была преобразована в Константиновское землемерное училище, а в 1835 г. – в Константиновский межевой институт, ныне – крупное высшее учебное заведение по подготовке геодезистов и картографов МИИГАиК – Московский институт инженеров геодезии, аэрофото-съемки и картографии. В 1809 г. в Санкт-Петербурге был учрежден институт Корпуса инженеров путей сообщения, в 1822 г. – корпус военных топографов, выполнявший впоследствии большую часть топографо-геодезических работ в стране.

В 1816 г. под руководством русского военного геодезиста К. И. Теннера и астронома В. Я. Струве в западных пограничных губерниях России были начаты большие астрономо-геодезические работы, которые в 1855 г. завершились градусным измерением огромной (более 25° по широте) дуги меридиана, простирающейся по меридиану 30° от устья Дуная до берегов Северного Ледовитого океана.

На развитие геодезии в России большое влияние оказали начавшиеся в XIX веке изыскания и строительство железных дорог. На Кавказе были выполнены первые опытные наземные фотосъемки, а в 1898 г. инженер П.И. Шуров применил ее при изысканиях линии, соединяющей Маньчжурскую и Забайкальскую железные дороги. Инженер Р.Ю. Тилле впервые выдвинул идею применения аэрофотосъемки при железнодорожных изысканиях. В 1908–1909 гг. он опубликовал трехтомный труд «Фотогра-

фия в современном развитии», сыгравший огромную роль в развитии аэрофотосъемки в России.

В 1928 г. советский геодезист Ф. Н. Красовский разработал стройную и научно обоснованную схему и программу построения опорной геодезической сети, предусматривающую создание астрономо-геодезической сети на всей территории СССР. В ходе построения этой сети были усовершенствованы теория, методы и инструменты астрономических определений и геодезических измерений.

В 1940 г. Ф.Н. Красовский и А. А. Изотов определили новые размеры земного эллипсоида, которые по настоящее время используются для картографо-геодезических работ в России и ряде других стран.

1.3. Задачи инженерной геодезии

Основными задачами инженерной геодезии при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации различных сооружений являются:

- получение геодезических данных (геодезические измерения) 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.

Инженерно-геодезические изыскания проводят для создания карт, планов, цифровых моделей местности, на которых по результатам наземных и аэрокосмических съемок изображают то, что находится на местности. Созданную топографо-геодезическую основу используют для проектирования сооружения – разработки его проекта.

При строительстве с помощью геодезических измерений выполняют обратное геометрическое преобразование – переносят проект сооружения на местность, т. е. определяют на местности то место, где сооружение должно располагаться по проекту. Данный процесс называют геодезическим сопровождением строительства.

Для разных видов сооружений применяют различные требования к точности геодезического сопровождения. Точность выполнения работ

при установке конструкций здания на предусмотренные проектом места должна быть в пределах 5...10 мм, деталей заводского конвейера – 1...2 мм, оборудования физических лабораторий для ускорителей ядерных частиц – 0,2...0,5 мм.

По окончании строительства объекта и в период его эксплуатации возникает задача периодического контроля за состоянием возведенного сооружения, называемая мониторингом состояния сооружения. Данный мониторинг выполняется специализированными изыскательскими и геодезическими организациями как наземными, так и аэрокосмическими методами.

По виду выполняемых работ инженерная геодезия подразделяется на наземную, подземную (маркшейдерское дело), воздушную и подводную.

1.4. Понятие о форме и размерах Земли

1.4.1. Общие положения

В геодезии для обозначения формы земной поверхности используют термин «**фигура Земли**».

Знание фигуры и размеров Земли необходимо во многих областях и прежде всего для определения положения объектов на земной поверхности и правильного её изображения в виде карт, планов и цифровых моделей местности.

Физическая поверхность Земли состоит из подводной (70,8 %) и надводной (29,2 %) частей. Подводная поверхность включает в себя систему срединно-океанических хребтов, подводные вулканы, океанические желоба, подводные каньоны, океанические плато и абиссальные равнины. Надводная часть земной поверхности также характеризуется многообразием форм. С течением времени поверхность Земли из-за тектонических процессов и эрозии постоянно изменяется.

Представление о фигуре Земли (рис. 2) в целом можно получить, вообразив, что вся планета ограничена мысленно продолженной поверхностью океанов в спокойном состоянии.



Рис. 2. Фигура Земли (вид из космоса)

Уровенных поверхностей, огибающих Землю, можно вообразить множество. Та из них, что совпадает со средним уровнем воды океанов в спокойном состоянии, т. е. в момент полного равновесия всей массы находящейся в ней воды под влиянием силы тяжести, называется **основной уровенной поверхностью Земли**.

В геодезии, как и в любой другой науке, одним из основополагающих принципов является принцип перехода от общего к частному. Исходя из него, для решения научных и инженерных задач по изучению физической поверхности Земли, а также других геодезических задач, сначала необходимо определиться с математической моделью поверхности Земли.

Что принимается за математическую поверхность Земли? Что является фигурой Земли? Какие у неё размеры?

Ответы на эти вопросы рассмотрим далее.

1.4.2. Математическая поверхность Земли

Рассмотрим любое тело в виде материальной точки A на физической поверхности Земли (рис. 3).

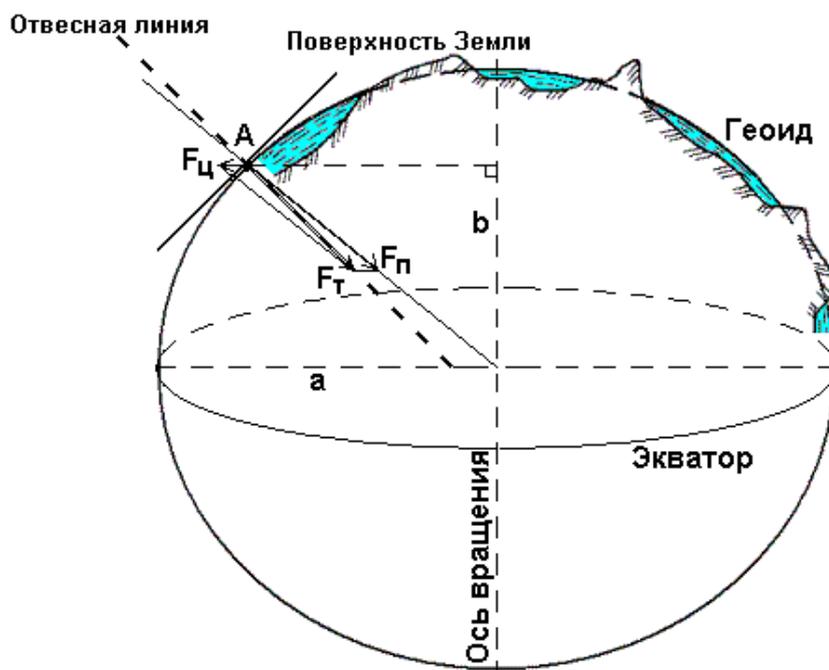


Рис. 3. Геоид – уровенная поверхность Земли

На точку A оказывают влияние две силы: сила притяжения F_{π} , направленная к центру Земли, и центробежная сила вращения Земли вокруг своей оси F_{τ} , направленная от оси вращения по перпендикуляру. Равнодействующая этих сил называется силой тяжести F_{τ} .

В любой точке земной поверхности направление силы тяжести, называемое ещё вертикальной или отвесной линией, можно легко и просто определить с помощью уровня или отвеса. Оно играет очень большую роль в геодезии. По направлению силы тяжести ориентируется одна из осей пространственной системы координат.

Если через точку A построить замкнутую поверхность, которая в каждой своей точке будет перпендикулярна отвесной линии (направлению силы тяжести), то данную поверхность можно принять в качестве математической при решении некоторых частных задач в геодезии. Такая поверхность получила название **уровенной** или **горизонтальной**. Её недостаток в том, что она содержит элемент неопределенности, т. е. через любую точку можно провести свою уровенную поверхность, и таких поверхностей будет бесчисленное множество.

Для устранения этой неопределенности при решении общих геодезических задач принимается так называемая **общая математическая поверхность**, т. е. **уровенная поверхность**, которая в каждой своей точке совпадает со средним уровнем морей и океанов в момент полного равновесия всей массы воды под влиянием силы тяжести. Такая поверхность носит название **общей фигуры Земли** или **поверхности геоида**.

Геоид – выпуклая замкнутая поверхность, совпадающая с поверхностью воды в морях и океанах в спокойном состоянии и перпендикулярная к направлению силы тяжести в любой её точке (см. рис. 3).

Из-за неравномерного распределения масс внутри Земли геоид не имеет правильной геометрической формы, и в математическом отношении его поверхность характеризуется слишком большой сложностью. Поэтому там, где это допустимо, поверхность геоида заменяется приближенными математическими моделями, в качестве которых принимается в одних случаях **земной сфероид**, в других – **земной шар**, а при топографическом изучении незначительных по размеру территорий – **горизонтальная плоскость**, т. е. плоскость, перпендикулярная к вертикальной линии в данной точке.

Земной сфероид – эллипсоид вращения, который получается вращением эллипса вокруг его малой оси b (см. рис. 3), совпадающей с осью вращения Земли, причем центр эллипсоида совмещается с центром Земли.

Размеры эллипсоида подбирают при условии наилучшего совпадения поверхности эллипсоида и геоида в целом (общеземной эллипсоид) или отдельных его частей (референц-эллипсоид).

Фигура референц-эллипсоида наилучшим образом подходит для территории отдельной страны или нескольких стран. Как правило, референц-эллипсоиды принимают для обработки геодезических измерений законодательно.

Наиболее удачная математическая модель Земли в виде референц-эллипсоида была предложена проф. Ф. Н. Красовским с большой полуосью $a = 6378245$ м, малой – $b = 6356863$ м и коэффициентом сжатия у полюсов $a = (a-b)/a = 1/298.3 \sim 1/300$.

Постановлением Совета Министров СССР № 760 от 7 апреля 1946 года эллипсоид Красовского принят для территории нашей страны в качестве математической поверхности Земли.

В инженерной геодезии для практических расчетов за математическую поверхность Земли принимают шар со средним радиусом $R = 6371.11$ км. Объем шара равен объему земного эллипсоида.

1.4.3. Физическая поверхность Земли

При топографическом изучении физической поверхности Земли надводная и подводная части рассматриваются отдельно. Надводная часть (суша) – **местность (территория)** является предметом изучения *топографии*. Подводную часть – **акваторию** (поверхность, покрытую водами морей и океанов) изучает *океанография*.

В свою очередь местность разделяют на ситуацию и рельеф.

Ситуацией называют совокупность постоянных предметов местности: рек, озер, растительного покрова, дорожной сети, населенных мест, сооружений и т. п. Границы между отдельными объектами ситуации называются **контурами местности**.

Рельефом (от лат. *relevo* поднимаю) называют совокупность неровностей суши, дна океанов и морей, разнообразных по очертаниям, размерам, происхождению, возрасту и истории развития (рис. 4).



Рис. 4. Рельеф местности

Рельеф как совокупность неровностей физической поверхности Земли рассматривается по отношению к её уровенной поверхности.

Рельеф складывается из положительных (выпуклых) и отрицательных (вогнутых) форм и образуется главным образом в результате длительного одновременного воздействия на земную поверхность эндогенных (внутренних) и экзогенных (внешних) процессов.

Рельеф изучает *геоморфология*.

1.5. Проектирование земной поверхности. Системы координат

1.5.1. Общие положения

Топографическое изучение земной поверхности заключается в определении положения ситуации и рельефа относительно математической поверхности Земли, т. е. в определении пространственных координат характерных точек, необходимых и достаточных для моделирования местности. Модель местности может быть представлена в виде геодезических чертежей, изготовление которых называют картографированием, и аналитически – в виде совокупности координат характерных точек. Для построения моделей местности в геодезии применяют метод проекций и различные системы координат.

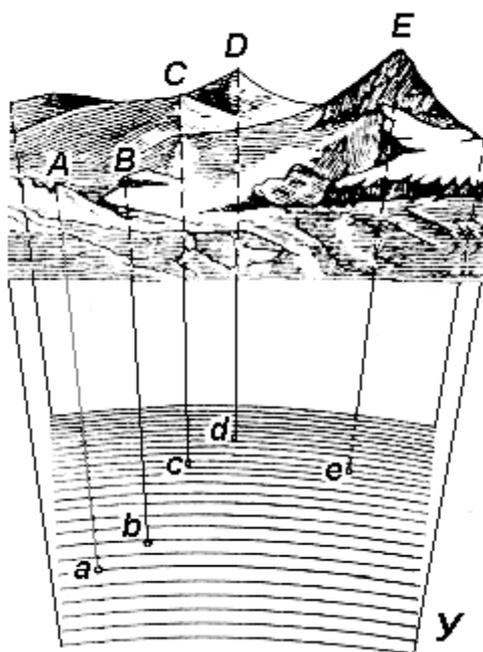


Рис. 5. Проектирование точек местности на уровенную поверхность Земли

Метод проекций заключается в том, что изучаемые точки (A, B, C, D, E) местности с помощью вертикальных (отвесных) линий проектируют на уровенную поверхность $У$ (рис. 5), в результате чего получают горизонтальные проекции этих точек (a, b, c, d, e). Отрезки Aa, Bb, Cc, Dd, Ee называют высотами точек, а численные их значения – отметками.

Высота точки является одной из её пространственных координат. Отметка называется абсолютной, если в качестве уровенной поверхности принимается геоид, и относительной или условной, если для этого принимается произвольная уровенная поверхность.

Две другие недостающие координаты точки определяются с помощью системы координат, построенной на математической поверхности Земли (рис. 6).

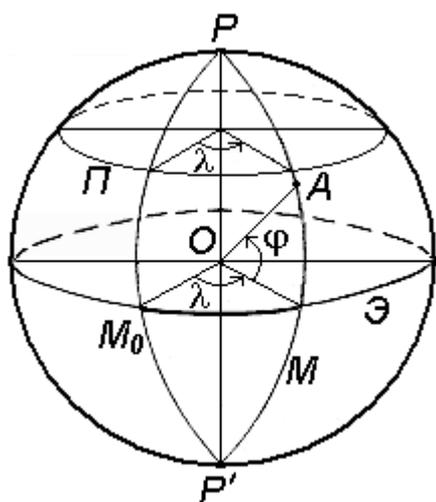


Рис. 6. Система географических координат

Через любую точку поверхности референц-эллипсоида можно провести две взаимно перпендикулярные плоскости:

– **плоскость геодезического меридиана** – плоскость, проходящую через ось вращения Земли PP' ;

– **плоскость геодезической широты** – плоскость, которая перпендикулярна плоскости геодезического меридиана.

Следы сечения поверхности референц-эллипсоида этими плоскостями называют **меридианом** (M) и **параллелью** (Π).

Меридиан, проходящий через астрономическую обсерваторию в Гринвиче, называется **начальным** или **нулевым** (M_0).

Параллель, плоскость которой проходит через центр Земли O , называется **экватором** (\mathcal{E}).

Плоскость, проходящая через центр Земли O перпендикулярно к её оси вращения PP' , называется **экваториальной**.

Основой для всех систем координат являются плоскости меридиана и экватора.

Системы координат подразделяются на угловые, линейные и линейно-угловые.

Примером угловых координат являются географические координаты (см. рис. 6): широта φ и долгота λ . Вдоль соответствующих параллели и меридиана широта и долгота точек постоянны.

В геодезии применяются следующие системы координат:

- геодезические;
- астрономические;
- географические;
- плоские прямоугольные геодезические (зональные);
- полярные;
- местные.

1.5.2. Геодезические координаты

Геодезические координаты определяют положение точки земной поверхности на референц-эллипсоиде (рис. 7).

Геодезическая широта B – угол, образованный нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке и плоскостью его экватора. Широта отсчитывается от экватора к северу или югу от 0° до 90° и соответственно называется северной или южной широтой.

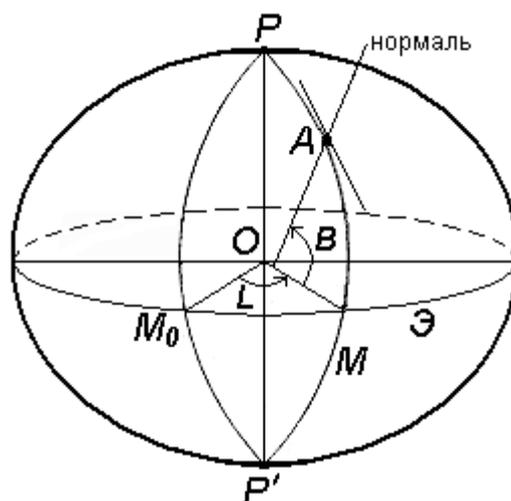


Рис. 7. Система геодезических координат

Геодезическая долгота L – двугранный угол между плоскостями геодезического меридиана данной точки и начального геодезического Гринвичского меридиана.

Долготы точек, расположенных к востоку от начального меридиана, называются восточными, а к западу – западными.

1.5.3. Астрономические координаты (для геодезии)

Астрономическая широта φ и долгота λ определяют положение точки земной поверхности относительно экваториальной плоскости и плоскости начального астрономического меридиана (рис. 8).

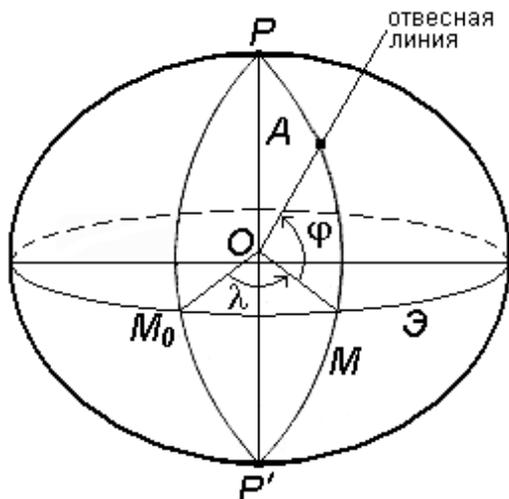


Рис. 8. Система астрономических координат

Плоскостью астрономического меридиана является плоскость, проходящая через отвесную линию в данной точке и параллельная оси вращения Земли.

Астрономическая широта φ – угол, образованный отвесной линией в данной точке и экваториальной плоскостью.

Астрономическая долгота λ – двугранный угол между плоскостями астрономического меридиана данной точки и начального астрономического меридиана.

Астрономическая широта φ и долгота λ определяются астрономическими наблюдениями.

блюдениями.

Геодезические и астрономические координаты отличаются (имеют расхождение) из-за отклонения отвесной линии от нормали к поверхности эллипсоида. При составлении географических карт этим отклонением пренебрегают.

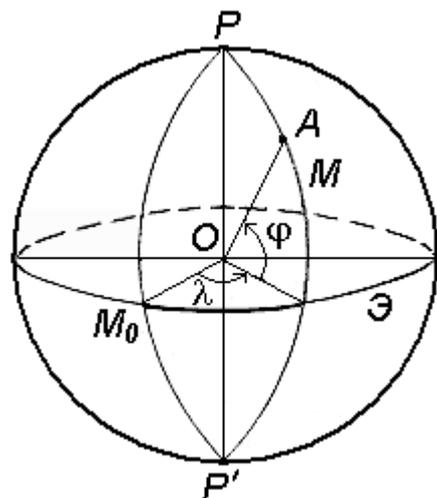


Рис. 9. Система географических координат

1.5.4. Географические координаты

Географические координаты – величины, обобщающие две системы координат: геодезическую и астрономическую – используют в тех случаях, когда отклонение отвесных линий от нормали к поверхности не учитывается (рис. 9).

Географическая широта φ – угол, образованный отвесной линией в данной точке и экваториальной плоскостью.

Географическая долгота λ – двугранный угол между плоскостями меридиана данной точки с плоскостью начального меридиана.

1.5.5. Плоские прямоугольные геодезические координаты (зональные)

При решении инженерно-геодезических задач в основном применяют плоскую прямоугольную геодезическую и полярную системы координат.

Для определения положения точек в плоской прямоугольной геодезической системе координат используют горизонтальную координатную плоскость **ХОУ** (рис. 10), образованную двумя взаимно перпендикулярными прямыми. Одну из них принимают за ось абсцисс **X**, другую – за ось ординат **Y**, точку пересечения осей **O** – за начало координат.

Изучаемые точки проектируют с математической поверхности Земли на координатную плоскость **ХОУ**. Так как сферическая поверхность не может быть спроектирована на плоскость без искажений (без разрывов и складок), то при построении плоской проекции математической поверхности Земли принимается неизбежность данных искажений, но при этом их величины должным образом ограничивают. Для этого применяется равноугольная картографическая проекция Гаусса – Крюгера¹, в которой математическая поверхность Земли проектируется на плоскость по участкам – зонам, на которые вся земная поверхность делится меридианами через 6° или 3° , начиная с начального меридиана (рис. 11).

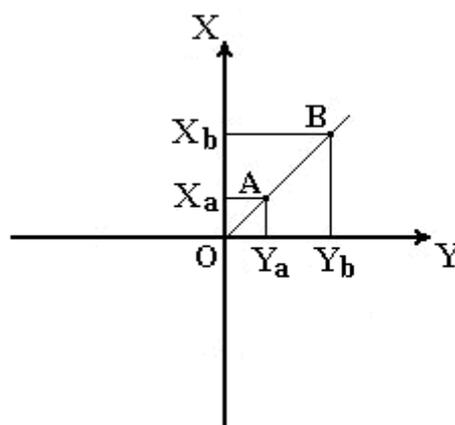


Рис. 10. Плоская прямоугольная система координат

¹ Названа по имени немецких ученых, предложивших данную проекцию и разработавших формулы для её применения в геодезии.

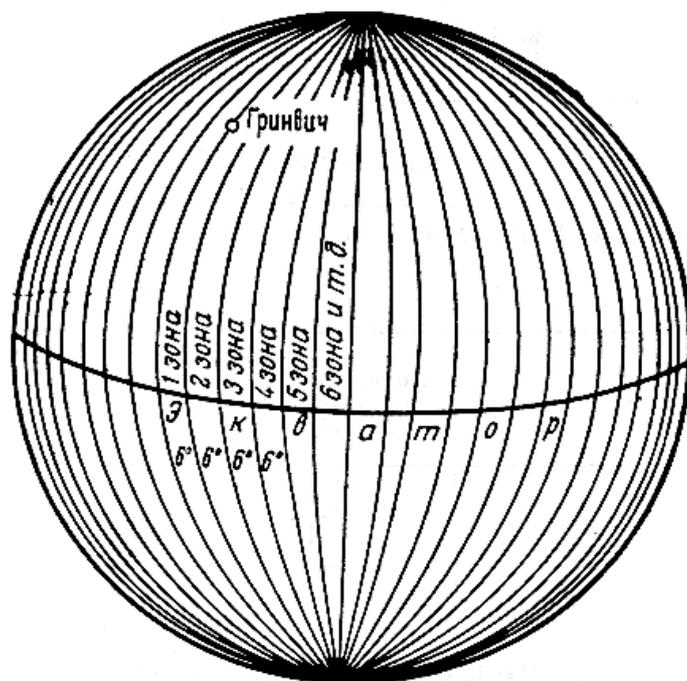


Рис. 11. Деление математической поверхности Земли на шестиградусные зоны

В пределах каждой зоны строится своя прямоугольная система координат. Все точки зоны проектируются на поверхность цилиндра (рис. 12, а), ось которого находится в плоскости экватора Земли, а его поверхность касается поверхности Земли вдоль среднего меридиана зоны, называемого осевым. При этом соблюдается условие сохранения подобия фигур на земле и в проекции при малых размерах этих фигур.

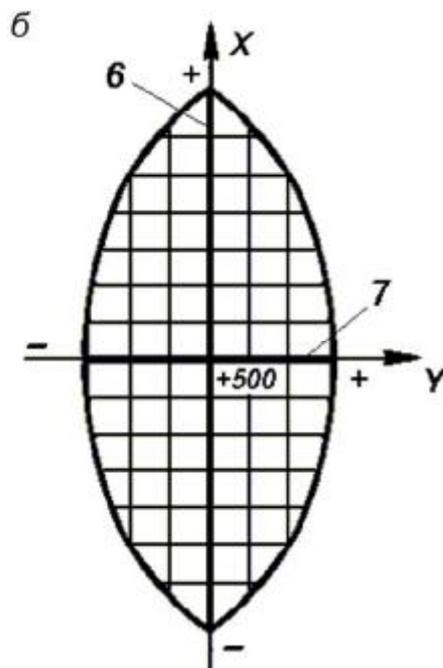
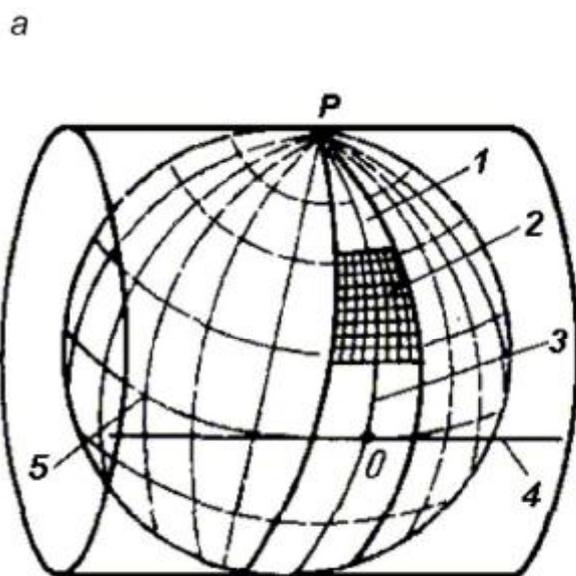


Рис. 12. Равноугольная картографическая проекция Гаусса – Крюгера (а) и зональная система координат (б): 1 – зона; 2 – координатная сетка; 3 – осевой меридиан; 4 – проекция экватора на поверхность цилиндра; 5 – экватор; 6 – ось абсцисс – проекция осевого меридиана; 7 – ось ординат – проекция экватора

После проектирования точек зоны на цилиндр, он разворачивается на плоскость, на которой изображение проекции осевого меридиана и соответствующего участка экватора будет представлена в виде двух взаимно перпендикулярных прямых (рис. 12, б). Точка пересечения их принимается за начало зональной плоской прямоугольной системы координат, изображение северного направления осевого меридиана – за положительную ось абсцисс, а изображение восточного направления экватора – за положительное направление оси ординат.

Для всех точек на территории нашей страны абсциссы имеют положительное значение. Чтобы ординаты точек также были только положительными, в каждой зоне ординату начала координат принимают равной 500 км (рис. 12, б). Таким образом, точки, расположенные к западу от осевого меридиана, имеют ординаты меньше 500 км, а к востоку – больше 500 км. Эти ординаты называют *преобразованными*.

На границах зон в пределах широт от 30° до 70° относительные ошибки, происходящие от искажения длин линий в этой проекции, колеблются от 1 : 1000 до 1 : 6000. Когда такие ошибки недопустимы, прибегают к трехградусным зонам.

На картах, составленных в равноугольной картографической проекции Гаусса – Крюгера, искажения длин в различных точках проекции различны, но по разным направлениям, выходящим из одной и той же точки, эти искажения будут одинаковы. Круг весьма малого радиуса, взятый на ровной поверхности, изобразится в этой проекции тоже кругом. Поэтому говорят, что рассматриваемая проекция конформна, т. е. сохраняет подобие фигур на сфере и в проекции при весьма малых размерах этих фигур. Таким образом, изображения контуров земной поверхности в этой проекции весьма близки к тем, которые получаются.

Четверти прямоугольной системы координат нумеруются. Их счет идет по ходу стрелки от положительного направления оси абсцисс (рис. 13).

Если за начало плоской прямо-

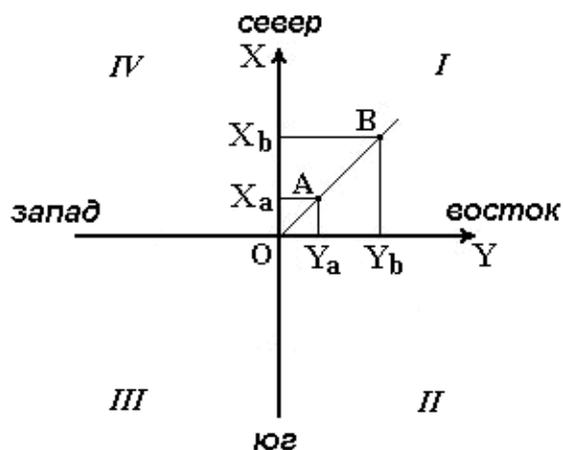


Рис. 13. Четверти прямоугольной системы координат

угольной системы координат принять произвольную точку, то она будет называться *относительной* или *условной*.

1.5.6. Полярные координаты

При выполнении съемочных и разбивочных геодезических работ часто применяют полярную систему координат (рис. 14). Она состоит из полюса **O** и полярной оси **OP**, в качестве которых принимается прямая с известным началом и направлением.

Для определения положения точек в данной системе используют линейно-угловые координаты: угол β , отсчитываемый по часовой стрелке от полярной оси **OP** до направления на горизонтальную проекцию точки **A'**, и полярное расстояние r от полюса системы **O** до проекции **A'**.

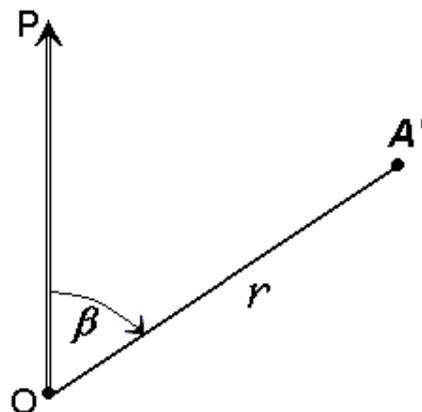


Рис. 14. Полярная система координат

1.5.7. Системы высот

Третьей координатой, определяющей положение точки в пространстве, является её высота.

В геодезии для определения отметок точек применяются следующие системы высот (рис. 15): ортометрическая (абсолютная); геодезическая; нормальная (обобщенная); относительная (условная).

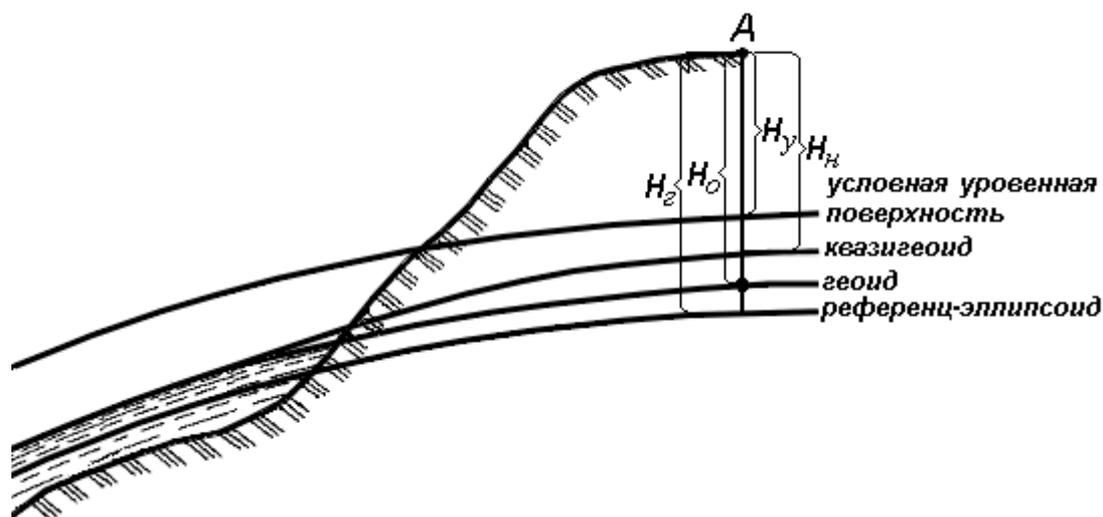


Рис. 15. Системы высот в геодезии

Ортометрическая (абсолютная) высота H_o – расстояние, отсчитываемое по направлению отвесной линии от поверхности геоида до данной точки.

Геодезическая высота H_e – расстояние, отсчитываемое по направлению нормали от поверхности референц-эллипсоида до данной точки.

В **нормальной системе высот** отметка точки H_H отсчитывается по направлению отвесной линии от поверхности **квазигеоида**, близкой к поверхности геоида.

Квазигеоид («якобы геоид») – фигура, предложенная в 1950-х гг. советским учёным М.С. Молоденским в качестве строгого решения задачи определения фигуры Земли. Квазигеоид определяется по измеренным значениям потенциалов силы тяжести согласно положениям теории М.С. Молоденского.

В нашей стране все высоты реперов государственной нивелирной сети определены в нормальной системе высот. Это связано с тем, что положение геоида под материками определить сложно. Поэтому с конца 40-х годов в СССР было принято решение не применять ортометрическую систему высот.

В России абсолютные высоты точек определяются в **Балтийской системе высот (БСВ)** относительно **нуля Кронштадтского футштока** – горизонтальной черты на медной пластине, прикрепленной к устью моста через обводной канал в г. Кронштадте.

Относительная высота H_y – измеряется от любой другой поверхности, а не от основной уровенной поверхности.

Местная система высот – **Тихоокеанская**, её уровенная поверхность ниже нуля Кронштадтского футштока на 1873 мм.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое геодезия и какие вопросы она решает?
2. Что такое физическая и уровенная поверхность Земли?
3. Что такое геоид?
4. Каковы размеры эллипсоида Ф.Н. Красовского?
5. Что называется геодезической широтой и долготой?
6. Какие системы координат применяются в геодезии?
7. В чем заключается суть зональной системы прямоугольных координат?
8. Что называется абсолютной и условной высотой точки?
9. Что называется отметкой точки на земной поверхности?

Лекция 2

ОРИЕНТИРОВАНИЕ НА МЕСТНОСТИ

План лекции

- 2.1. Понятие об ориентировании.
- 2.2. Дирекционные углы и осевые румбы, истинные и магнитные азимуты, зависимость между ними.
- 2.3. Прямая и обратная геодезическая задача.
- 2.4. Связь между дирекционными углами предыдущей и последующей линии.

2.1. Понятие об ориентировании

При выполнении геодезических работ на местности, а также при решении инженерно-геодезических задач на топографических картах и планах возникает необходимость в определении положения линий местности относительно какого-либо направления, принимаемого за основное (исходное). Такое определение называется **ориентированием**.

Чаще всего за основное принимается направление меридиана, и положение линий местности определяется относительно сторон горизонта – севера, востока, юга и запада. Такое ориентирование называется **ориентированием относительно стран света**.

В геодезии при ориентировании за основное направление принимают направление осевого, истинного или магнитного меридианов. При этом положение линии определяют с помощью соответствующих углов ориентирования: дирекционного угла, истинного или магнитного азимута.

2.2. Дирекционные углы и осевые румбы, истинные и магнитные азимуты, зависимость между ними

2.2.1. Дирекционные углы и осевые румбы

Осевой (средний) истинный меридиан зоны часто принимают за основное направление. В этом случае положение линии местности относительно осевого меридиана определяет угол ориентирования, называемый **дирекционным** (рис. 16).

Дирекционный угол измеряется от северного направления осевого меридиана в направлении движения часовой стрелки через восток, юг и запад. Следовательно, градусная величина дирекционного угла может иметь любое значение от 0° до 360° .

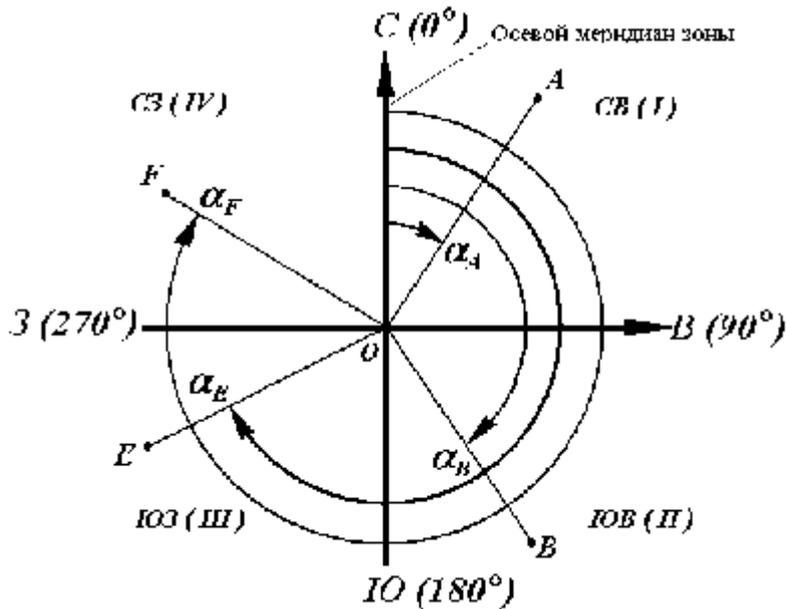


Рис. 16. Дирекционные углы

Для линии **OA** её дирекционным углом в точке **O** является горизонтальный угол α_{OA} между северным направлением осевого меридиана и направлением линии. Для линий **OB**, **OE** и **OF** – α_B , α_E и α_F .

Таким образом, **дирекционным углом** является угол в горизонтальной плоскости, отсчитываемый от северного направления осевого меридиана по ходу часовой стрелки до данной линии.

В геодезии принято различать прямое и обратное направление линии (рис. 17). Так, если **BC** считать прямым направлением линии, то **CB** будет обратным направлением той же линии. В соответствии с этим α_{BC} является прямым дирекционным углом линии **BC** в точке **M**, а угол α_{CB} – обратным дирекционным углом этой же линии в той же точке. Из рисунка видно, что $\alpha_{CB} = \alpha_{BC} + 180^\circ$, т. е. прямой и обратный дирекционные углы отличаются друг от друга на 180° .

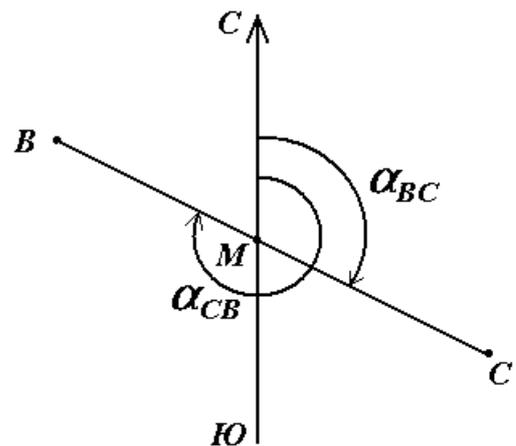


Рис. 17. Прямое и обратное направление линии

Иногда для ориентирования линий местности пользуются не дирекционными углами, а осевыми румбами (рис. 18).

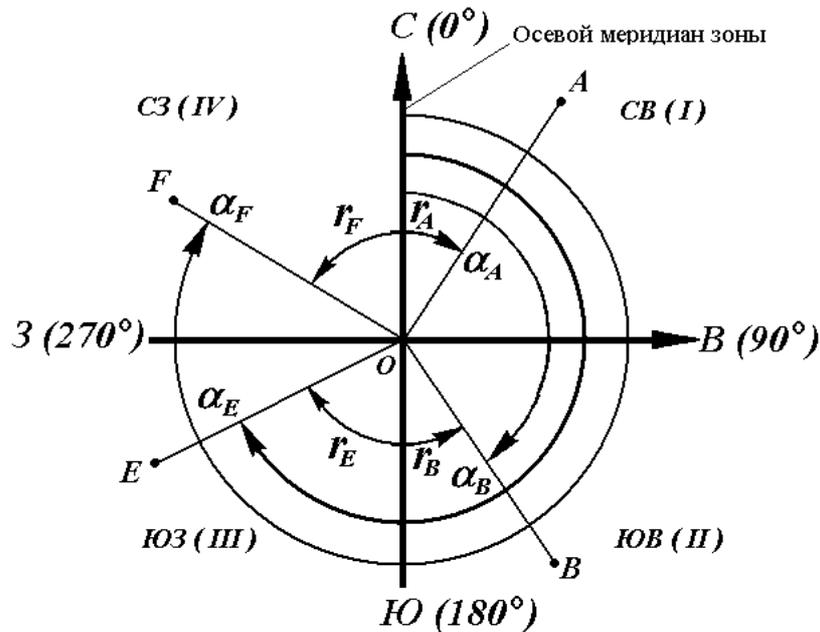


Рис. 18. Осевые румбы и дирекционные углы

Осевым румбом называется острый горизонтальный угол, отсчитываемый от ближайшего направления осевого меридиана (северного или южного) до данной линии. Румбы обозначают буквой r с индексом, указывающим четверть, в которой находится румб.

Название четвертей составлены из соответствующих обозначений главных точек горизонта: север (С), юг (Ю), восток (В), запад (З).

Зависимость между дирекционными углами и румбами определяется для четвертей по следующим формулам:

I четверть (СВ) $r = \alpha$,

II четверть (ЮВ) $r = 180^\circ - \alpha$,

III четверть (ЮЗ) $r = \alpha - 180^\circ$,

IV четверть (СЗ) $r = 360^\circ - \alpha$.

Румб в точке **М** направления **ВС** называется прямым, а противоположного направления **СВ** – обратным. Прямой и обратный румб в одной и той же точке данной линии равны по численному значению, но имеют индексы противоположных четвертей (рис. 19).

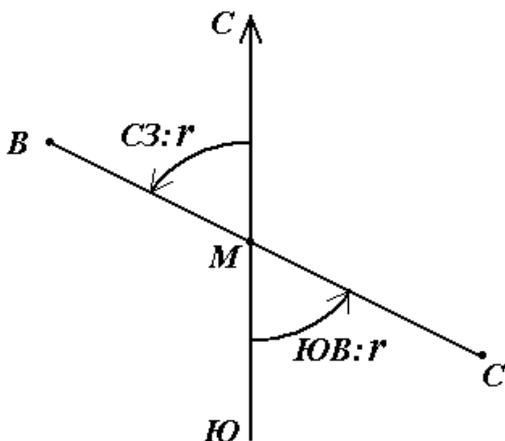


Рис. 19. Прямой и обратный румбы противоположных четвертей (рис. 19).

2.2.2. Истинные азимуты и румбы

Кроме осевого меридиана зоны при ориентировании линий местности за основное направление может приниматься **направление истинного (географического) меридиана**.

Истинный меридиан – линия пересечения земной поверхности с плоскостью, проходящей через отвесную линию и ось вращения Земли.

Положение линии местности относительно истинного меридиана определяется истинным азимутом или истинным румбом.

Истинный азимут линии – угол в горизонтальной плоскости, отсчитываемый от северного направления истинного меридиана по ходу часовой стрелки до данной линии (рис. 20).

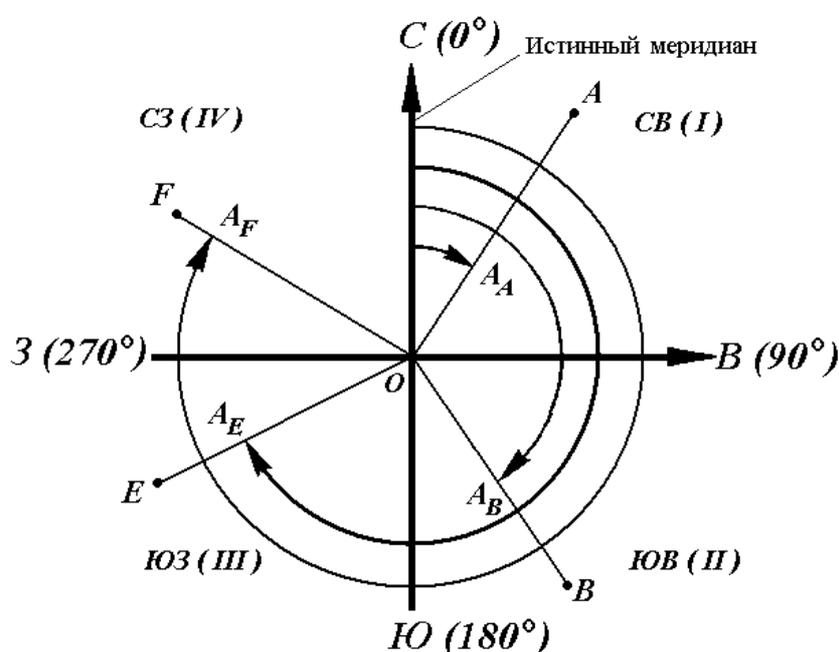


Рис. 20. Истинные азимуты

Истинный румб линии – острый горизонтальный угол, отсчитываемый от ближайшего направления истинного меридиана (северного или южного) до данной линии.

Истинный азимут A измеряется от 0° до 360° . Зависимость между истинными азимутами и румбами такая же, как и между дирекционными углами и осевыми румбами.

Истинные меридианы, проходящие через точки Земли с разной долготой, не параллельны между собой и сходятся на полюсах. Поэтому азимуты одной и той же прямой линии, определяемые относительно разных истинных меридианов, отличаются на величину γ (рис. 21), которую называют углом сближения меридианов. Его приближенное значение можно рассчитать по формуле

$$\gamma = 0,54 \cdot l \cdot \operatorname{tg} \varphi \text{ или } \gamma = \sin \varphi \cdot \Delta \lambda,$$

где l – длина прямой линии между точками, км; φ – средняя широта линии; $\Delta \lambda$ – разность долгот. При $l = 1$ км и широте Хабаровска $\varphi = 48^{\circ}28'$ угол сближения меридианов $\gamma = 0,6' = 36''$.

Для перехода от дирекционного угла к истинному азимуту и наоборот необходимо знать угол сближения γ между осевым и истинным меридианами (рис. 21). Зависимость между истинным азимутом и дирекционным углом следующая

$$A = \alpha + \gamma.$$

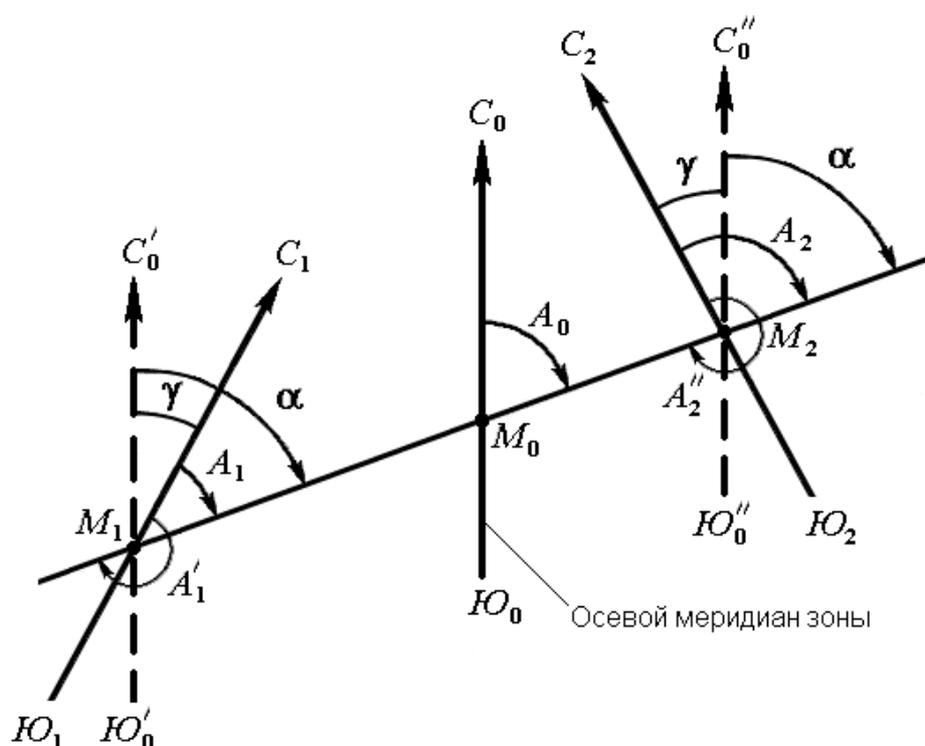


Рис. 21. Зависимость между истинным азимутом и дирекционным углом

Если точка расположена к западу от осевого меридиана, то величину угла сближения γ между осевым и истинным меридианами принято считать отрицательной, если к востоку – положительной (рис. 21). Например, истинные азимуты линии при дирекционном угле $\alpha = 70^{\circ}$ и углах сближения $\gamma = -0^{\circ}50'$ для западной точки M_1 , $\gamma = 0^{\circ}50'$ для восточной – M_2 соответственно равны

$$A_1 = 70^{\circ} - 0^{\circ}50' = 69^{\circ}10',$$

$$A_2 = 70^{\circ} + 0^{\circ}50' = 70^{\circ}50'.$$

2.2.3. Магнитные азимуты и румбы

При ориентировании линий местности за основное направление может также приниматься **направление магнитного меридиана**.

Магнитная стрелка на концах имеет точки, в которых сосредоточены магнитные массы. Соединяющая их линия называется **магнитной осью стрелки**.

Вертикальная плоскость, проходящая через магнитную ось стрелки, является **плоскостью магнитного меридиана**.

Линия пересечения плоскости магнитного меридиана с горизонтальной плоскостью дает направление магнитного меридиана.

Горизонтальный угол, отсчитываемый от северного направления магнитного меридиана по ходу часовой стрелки до данной линии, называется **магнитным азимутом** A_M (рис. 22).

В каждой точке на поверхности Земли магнитный и истинный меридианы образуют между собой угол, называемый **склонением магнитной стрелки** δ (рис. 22). Северный конец магнитной стрелки может отклоняться от истинного меридиана к западу или к востоку. В зависимости от этого различают западное и восточное склонения. Западное склонение принято считать отрицательным, восточное – положительным:

$$A_{И} = A_M - \delta_{зап},$$

$$A_{И} = A_M + \delta_{вост}.$$

Магнитное склонение в разных пунктах Земли различно и непостоянно. Различают вековые, годовые и суточные изменения склонения. В связи с этим магнитная стрелка указывает направление магнитного меридиана приблизительно и ориентировать линию по нему можно только тогда, когда не требуется большая точность ориентирования.

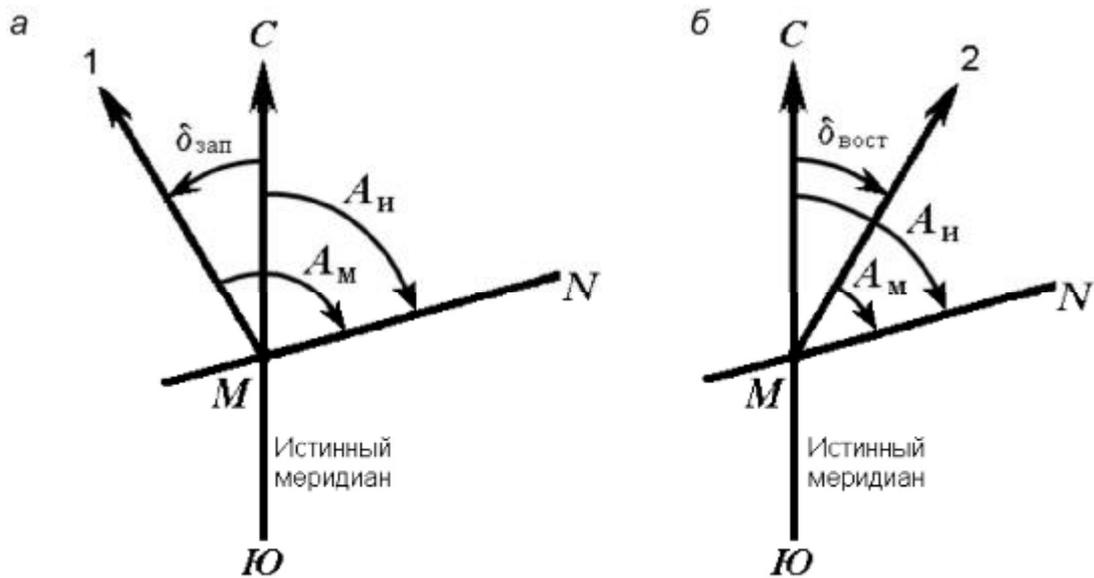


Рис. 22. Магнитный азимут и склонение магнитной стрелки:
а – западное; б – восточное

2.3. Прямая и обратная геодезическая задача

2.3.1. Прямая геодезическая задача

В геодезии часто приходится передавать координаты с одной точки на другую. Например, зная исходные координаты точки **A** (рис. 23), горизонтальное расстояние S_{AB} от неё до точки **B** и направление линии, соединяющей обе точки (дирекционный угол α_{AB} или румб r_{AB}), можно определить координаты точки **B**. В такой постановке передача координат называется **прямой геодезической задачей**.

Для точек, расположенных на сфероиде, решение данной задачи представляет значительные трудности. Для точек на плоскости она решается следующим образом.

Дано: точка **A** (X_A, Y_A), S_{AB} и α_{AB} .
Найти: точку **B** (X_B, Y_B).

Непосредственно из рисунка имеем

$$\Delta X = X_B - X_A,$$

$$\Delta Y = Y_B - Y_A.$$

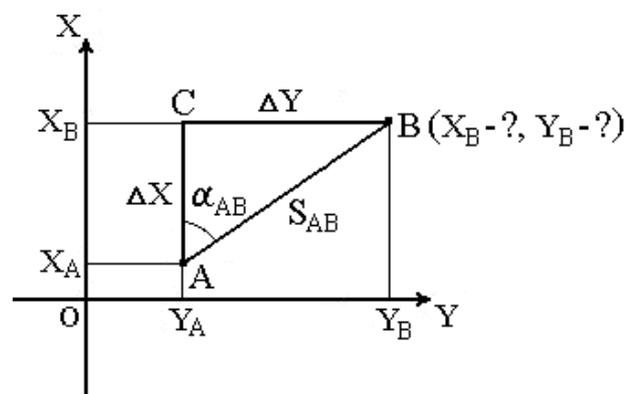


Рис. 23. Прямая геодезическая задача

Разности ΔX и ΔY координат точек последующей и предыдущей называются приращениями координат. Они представляют собой проекции

отрезка **AB** на соответствующие оси координат. Их значения находим из прямоугольного прямоугольника **ABC**

$$\Delta X = S_{AB} \cos \alpha_{AB} ,$$

$$\Delta Y = S_{AB} \sin \alpha_{AB} .$$

Так как в этих формулах S_{AB} всегда число положительное, то знаки приращений координат ΔX и ΔY зависят от знаков $\cos \alpha_{AB}$ и $\sin \alpha_{AB}$. Для различных значений углов знаки ΔX и ΔY представлены в табл. 1.

Таблица 1

Знаки приращений координат ΔX и ΔY

Приращения координат	Четверть окружности, в которую направлена линия			
	I (СВ)	II (ЮВ)	III (ЮЗ)	IV (СЗ)
ΔX	+	-	-	+
ΔY	+	+	-	-

При помощи румба приращения координат вычисляем по формулам:

$$\Delta X = S_{AB} \cos r_{AB} ,$$

$$\Delta Y = S_{AB} \sin r_{AB} .$$

Знаки приращениям дают в зависимости от названия румба.

Вычислив приращения координат, находим искомые координаты другой точки:

$$X_B = X_A + \Delta X ,$$

$$Y_B = Y_A + \Delta Y .$$

Таким образом можно найти координаты любого числа точек по правилу: координаты последующей точки равны координатам предыдущей точки плюс соответствующие приращения.

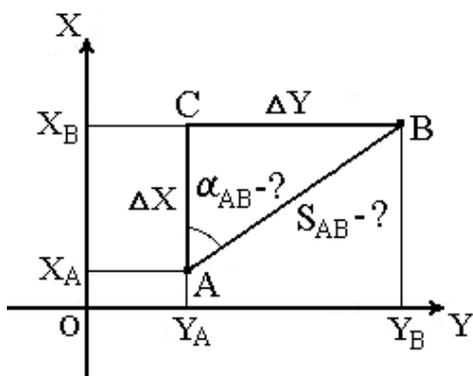


Рис. 24. Обратная геодезическая задача

2.3.2. Обратная геодезическая задача

Обратная геодезическая задача заключается в том, что при известных координатах точек **A** (X_A, Y_A) и **B** (X_B, Y_B) необходимо найти длину S_{AB} и направление линии **AB**: румб r_{AB} и дирекционный угол α_{AB} (рис. 24).

Данная задача решается следующим образом.

Сначала находим приращения координат

$$\Delta X = X_B - X_A,$$

$$\Delta Y = Y_B - Y_A.$$

Величину угла r_{AB} определяем из отношения

$$\frac{\Delta Y}{\Delta X} = \operatorname{tgr}_{AB}.$$

По знакам приращений координат вычисляем четверть, в которой располагается румб, и его название. Используя зависимость между дирекционными углами и румбами, находим α_{AB} .

Для контроля расстояние S_{AB} вычисляем дважды при помощи формул:

$$S_{AB} = \frac{\Delta X}{\cos \alpha_{AB}} = \frac{\Delta Y}{\sin \alpha_{AB}} = \Delta X \operatorname{sec} \alpha_{AB} = \Delta Y \operatorname{cosec} \alpha_{AB},$$

$$S_{AB} = \frac{\Delta X}{\cos r_{AB}} = \frac{\Delta Y}{\sin r_{AB}} = \Delta X \operatorname{sec} r_{AB} = \Delta Y \operatorname{cosec} r_{AB}.$$

Расстояние S_{AB} можно определить также по формуле

$$S_{AB} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}.$$

2.4. Связь между дирекционными углами предыдущей и последующей линии

На рис. 25 представлена схема определения дирекционных углов сторон теодолитного хода **AB**. Известен дирекционный угол исходной стороны α_0 и измерены геодезическим прибором теодолитом углы $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, лежащие справа по ходу от **A** к **B**.

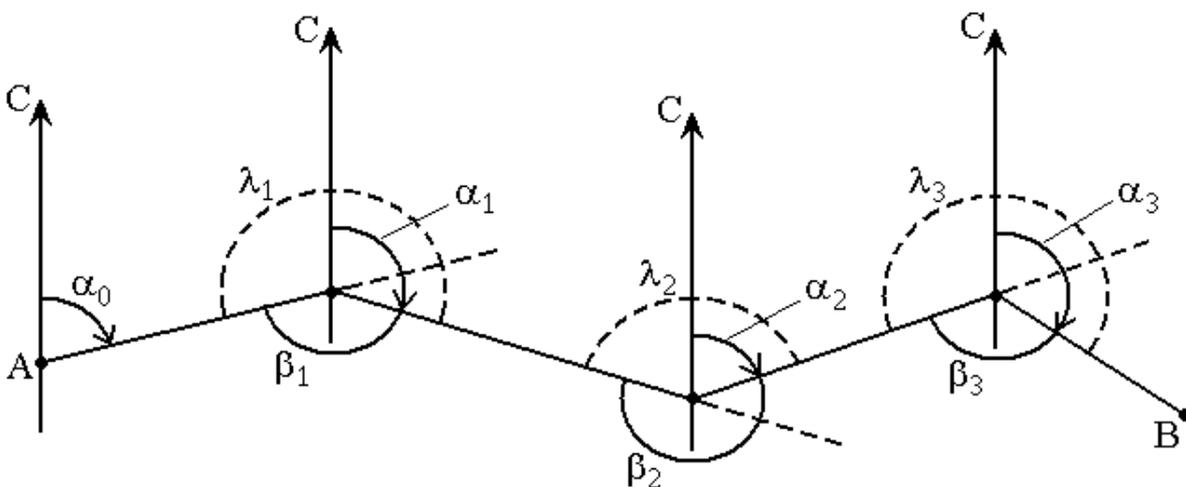


Рис. 25. Схема определения дирекционных углов сторон теодолитного хода

Найдём дирекционные углы a_1, a_2, a_3 остальных сторон хода.

На основании зависимости между прямыми и обратными дирекционными углами можем написать

$$a_1 + \beta_1 = a_0 + 180^\circ.$$

Из данного выражения следует, что

$$a_1 = a_0 + 180^\circ - \beta_1. \quad (1)$$

Аналогично вычисляются дирекционные углы последующих сторон теодолитного хода

$$a_2 + \beta_2 = a_1 + 180^\circ \rightarrow a_2 = a_1 + 180^\circ - \beta_2, \quad (2)$$

$$a_3 + \beta_3 = a_2 + 180^\circ \rightarrow a_3 = a_2 + 180^\circ - \beta_3, \quad (3)$$

...

$$a_n + \beta_n = a_{n-1} + 180^\circ \rightarrow a_n = a_{n-1} + 180^\circ - \beta_n. \quad (n)$$

То есть, **дирекционный угол последующей стороны равен дирекционному углу предыдущей стороны плюс 180° и минус угол, лежащий справа по ходу.**

Для получения контрольной формулы в выражение (2) подставим значение a_1 из выражения (1)

$$a_2 = a_0 + 180^\circ - \beta_1 + 180^\circ - \beta_2 = a_0 + 2 \cdot 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2).$$

Если продолжить аналогичные действия для последующих сторон теодолитного хода, то получим

$$\begin{aligned} a_n &= a_0 + n \cdot 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_n) \rightarrow a_n - a_0 = \\ &= n \cdot 180^\circ - \sum \beta \rightarrow a_0 - a_n = \sum \beta - n \cdot 180^\circ. \end{aligned}$$

Данная формула может служить контрольной при вычислении дирекционных углов по увязанным углам β .

Если же вместо суммы исправленных углов подставить сумму измеренных углов $\sum \beta$, то та же формула позволит определить невязку f_β измеренных углов теодолитного хода, если дирекционные углы a_0 и a_n начальной и конечной сторон хода известны

$$f_\beta = \sum \beta - n \cdot 180^\circ - (a_0 - a_n).$$

Иногда дирекционные углы вычисляют по углам, лежащим слева по ходу от **A** до **B** ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$)

$$\beta_1 = 360^\circ - \lambda_1$$

$$\beta_2 = 360^\circ - \lambda_2$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\beta_n = 360^\circ - \lambda_n$$

масштаба. Для проектирования на горизонтальную плоскость какого-либо многоугольника (рис. 26) измеряют расстояния между его вершинами и горизонтальные проекции его углов.

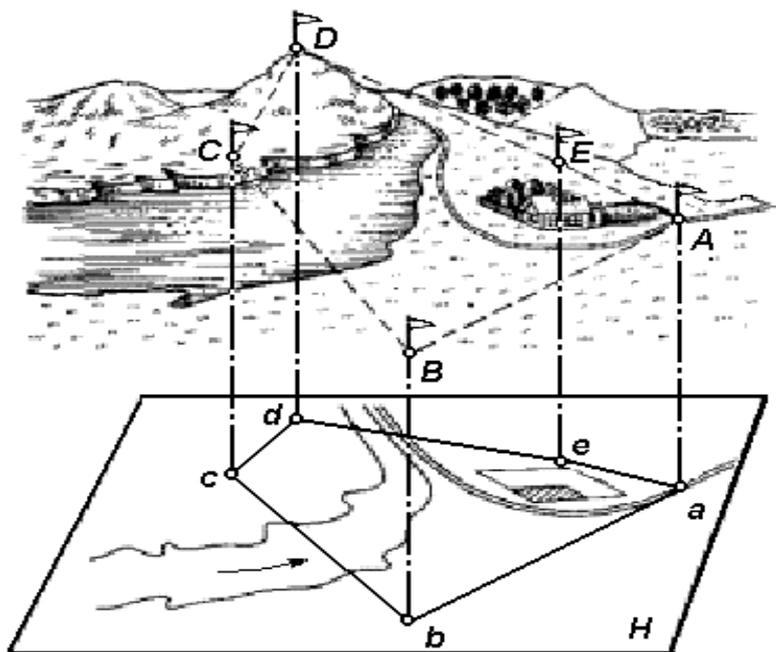


Рис. 26. Проектирование участка земной поверхности на горизонтальную плоскость

Совокупность линейных и угловых измерений на земной поверхности называется **геодезической съемкой**. По результатам геодезической съемки составляют план или карту.

План – чертеж, на котором в уменьшенном и подобном виде изображается горизонтальная проекция небольшого участка местности.

Карта – уменьшенное и искаженное вследствие влияния кривизны Земли изображение горизонтальной проекции значительной части или всей земной поверхности, построенное по определенным математическим законам.

Таким образом, и план, и карта – это уменьшенные изображения земной поверхности на плоскости. Различие между ними состоит в том, что при составлении карты проектирование производят с искажениями поверхности за счет влияния кривизны Земли, а на плане изображение получают практически без искажений.

В зависимости от назначения планы и карты могут быть контурные и топографические. На контурных планах и картах условными знаками изображают ситуацию, т. е. только контуры (очертания) горизонтальных проекций местных предметов (дорог, строений, пашен, лугов, лесов и т. п.).

На топографических картах и планах кроме ситуации изображают ещё рельеф местности.

Для проектирования железных, шоссейных дорог, каналов, трасс, водопроводов и других сооружений необходимо иметь вертикальный разрез или профиль местности.

Профилем местности называется чертеж, на котором изображается в уменьшенном виде сечение вертикальной плоскостью поверхности Земли по заданному направлению.

Как правило, разрез местности (рис. 27, а) представляет собой кривую линию **ABC...G**. На профиле (рис. 27, б) она строится в виде ломаной линии **abc...g**. Уровненную поверхность при этом изображают прямой линией. Для большей наглядности вертикальные отрезки (высоты, превышения) делают крупнее, чем горизонтальные (расстояния между точками).



Рис. 27. Вертикальный разрез (а) и профиль (б) местности

3.2. Рельеф. Основные формы рельефа

Рельеф – форма физической поверхности Земли, рассматриваемая по отношению к её уровенной поверхности.

Рельефом называется совокупность неровностей суши, дна океанов и морей, разнообразных по очертаниям, размерам, происхождению, возрасту и истории развития. При проектировании и строительстве железных, автомобильных и других сетей необходимо учитывать характер рельефа – горный, холмистый, равнинный и др.

Рельеф земной поверхности весьма разнообразен, но все многообразие форм рельефа для упрощения его анализа типизировано на небольшое количество основных форм (рис. 29).

К основным формам рельефа относятся.

Гора – это возвышающаяся над окружающей местностью конусообразная форма рельефа. Наивысшая точка её называется *вершиной*. Вершина может быть острой – *пик* или в виде площадки – *плато*. Боковая поверхность состоит из скатов. Линия слияния скатов с окружающей местностью называется *подоймой* или *основанием горы*.

Котловина – форма рельефа, противоположная горе, представляющая собой замкнутое углубление. Самая низкая точка её – *дно*. Боковая поверхность состоит из скатов; линия их слияния с окружающей местностью называется *бровкой*.

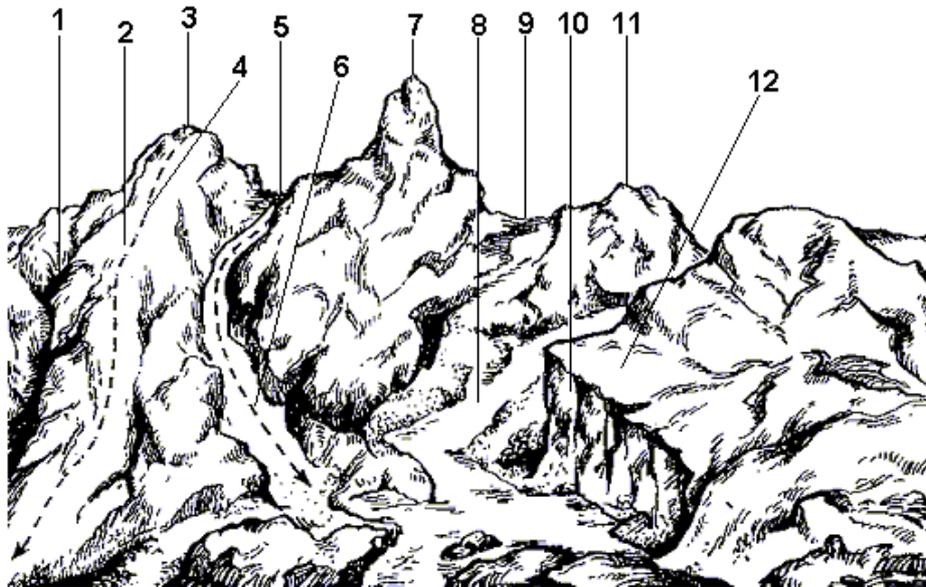


Рис. 29. Формы рельефа: 1 – лощина; 2 – хребет; 3, 7, 11 – гора; 4 – водораздел; 5, 9 – седловина; 6 – тальвег; 8 – река; 10 – обрыв; 12 – терраса

Хребет – это возвышенность, вытянутая и постоянно понижающаяся в каком-либо направлении. У хребта два склона; в верхней части хребта они сливаются, образуя водораздельную линию, или *водораздел*.

Лощина – форма рельефа, противоположная хребту и представляющая вытянутое в каком-либо направлении и открытое с одного конца постоянно понижающееся углубление. Два ската лощины, сливаясь между собой в самой низкой части её образуют водосливную линию или *талвег*, по которой стекает вода, попадающая на скаты. Разновидностями лощины являются *долина* и *овраг*: первая является широкой лощиной с пологими задернованными скатами, вторая – узкая лощина с крутыми обнаженными скатами. Долина часто бывает ложем реки или ручья.

Седловина – это место, которое образуется при слиянии скатов двух соседних гор. Иногда седловина является местом слияния водоразделов двух хребтов. От седловины берут начало две лощины, распространяющиеся в противоположных направлениях. В горной местности через седловины обычно пролегают дороги или пешеходные тропы, поэтому седловины в горах называют *перевалами*.

3.3. Изображение рельефа на планах и картах

Для решения инженерных задач изображение рельефа должно обеспечивать: во-первых, быстрое определение с требуемой точностью вы-

сот точек местности, направления крутизны скатов и уклонов линий; во-вторых, наглядное отображение действительного ландшафта местности.

Рельеф местности на планах и картах изображают различными способами (штриховкой, пунктиром, цветной пластикой), но чаще всего с помощью горизонталей (изогипсов), числовых отметок и условных знаков.

Горизонталь на местности можно представить как след, образованный пересечением уровенной поверхности с физической поверхностью Земли. Например, если представить холм, окружённый неподвижной водой, то береговая линия воды и есть **горизонталь** (рис. 30). Лежащие на ней точки имеют одинаковую высоту.

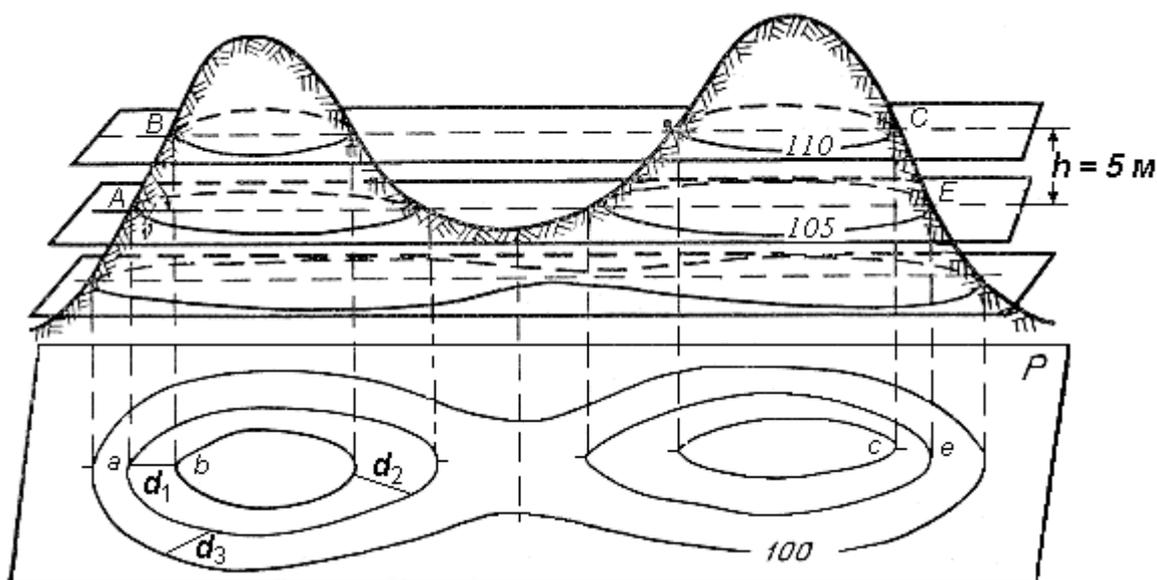


Рис. 30. Способ изображения рельефа горизонталями

Допустим, что высота уровня воды относительно уровенной поверхности 110 м (рис. 30). Предположим теперь, что уровень воды упал на 5 м и часть холма обнажилась. Кривая линия пересечения поверхностей воды и холма будет соответствовать горизонтали с высотой 105 м. Если последовательно снижать уровень воды по 5 м и проектировать кривые линии, образованные пересечением поверхности воды с земной поверхностью, на горизонтальную плоскость в уменьшенном виде, то получим изображение рельефа местности горизонталями на плоскости.

Таким образом кривая линия, соединяющая все точки местности с равными отметками, называется **горизонталью**.

При решении ряда инженерных задач необходимо знать свойства горизонталей:

1. Все точки местности, лежащие на горизонтали, имеют равные отметки.

2. Горизонталы не могут пересекаться на плане, поскольку они лежат на разных высотах. Исключения возможны в горных районах, когда горизонталями изображают нависший утес.

3. Горизонталы являются непрерывными линиями. Горизонталы, прерванные у рамки плана, замыкаются за пределами плана.

4. Расстояние между горизонтальными секущими плоскостями называется **высотой сечения рельефа** и обозначается буквой h .

Высота сечения рельефа в пределах плана или карты строго постоянна. Её выбор зависит от характера рельефа, масштаба и назначения карты или плана. Для определения высоты сечения рельефа иногда пользуются формулой

$$h = 0,2 \text{ мм} \cdot M,$$

где M – знаменатель масштаба.

Такая высота сечения рельефа называется нормальной.

5. Расстояние между соседними горизонталями на плане или карте называется **заложением ската** или склона. Заложение есть любое расстояние между соседними горизонталями (см. рис. 30), оно характеризует крутизну ската местности и обозначается d .

Вертикальный угол, образованный направлением ската с плоскостью горизонта и выраженный в угловой мере, называется **углом наклона** ската ν (рис. 31). Чем больше угол наклона, тем круче скат.

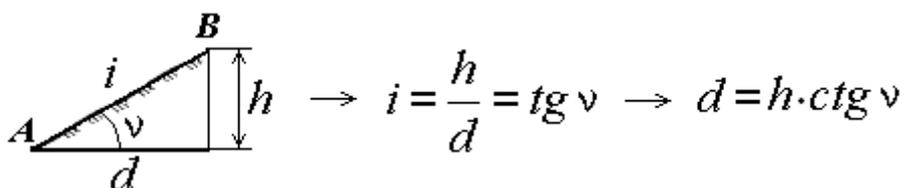


Рис. 31. Определение уклона и угла наклона ската

Другой характеристикой крутизны служит уклон i . Уклоном линии местности называют отношение превышения к горизонтальному проложению. Из формулы следует (рис. 31), что уклон безразмерная величина. Его выражают в сотых долях (%) или тысячных долях – промиллях (‰).

Если угол наклона ската до 45° , то он изображается горизонталями, если его крутизна более 45° , то рельеф обозначают специальными знаками. Например, обрыв показывается на планах и картах соответствующим условным знаком (рис. 32).

Изображение основных форм рельефа горизонталями приведено на рис. 32.

Для изображения рельефа горизонталями выполняют топографическую съемку участка местности. По результатам съемки определяют координаты (две плановые и высоту) для характерных точек рельефа и на-

носят их на план (рис. 33). В зависимости от характера рельефа, масштаба и назначения плана выбирают высоту сечения рельефа h . Для инженерного проектирования обычно принимают $h = 1$ м. Отметки горизонталей в этом случае будут кратны одному метру.

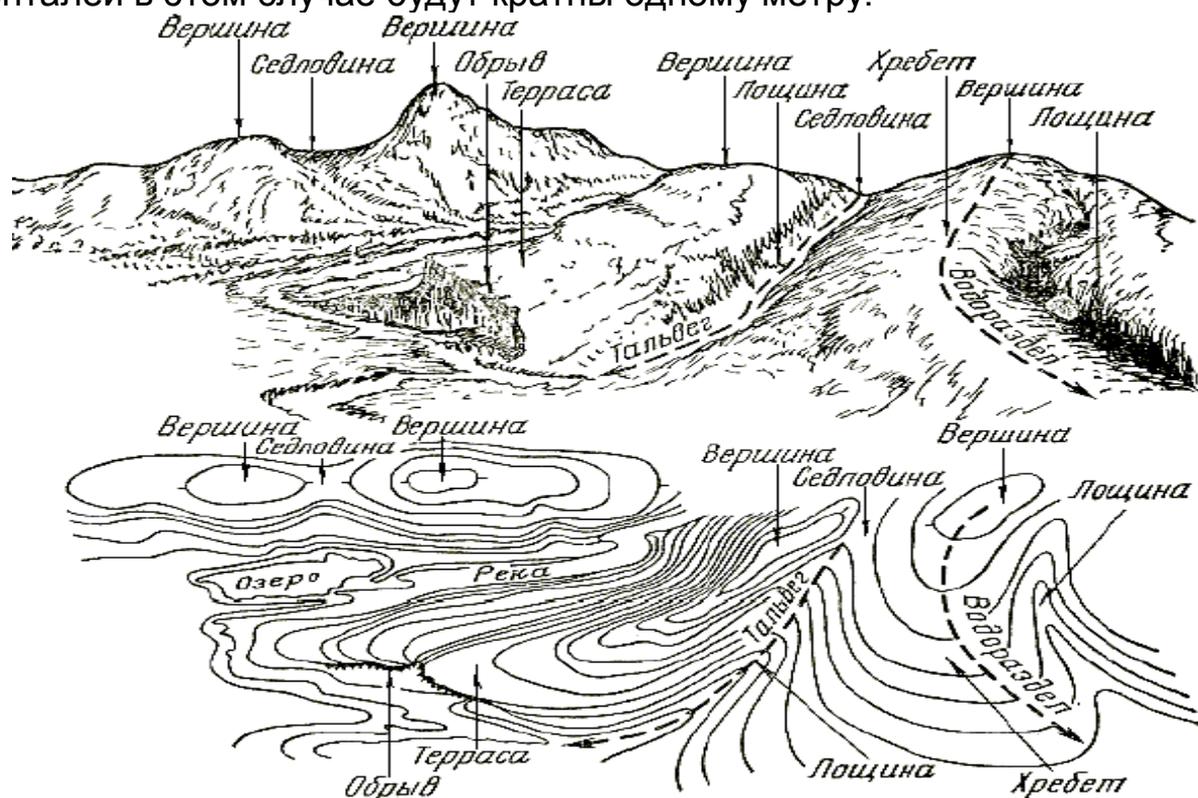


Рис. 32. Изображение форм рельефа горизонталями

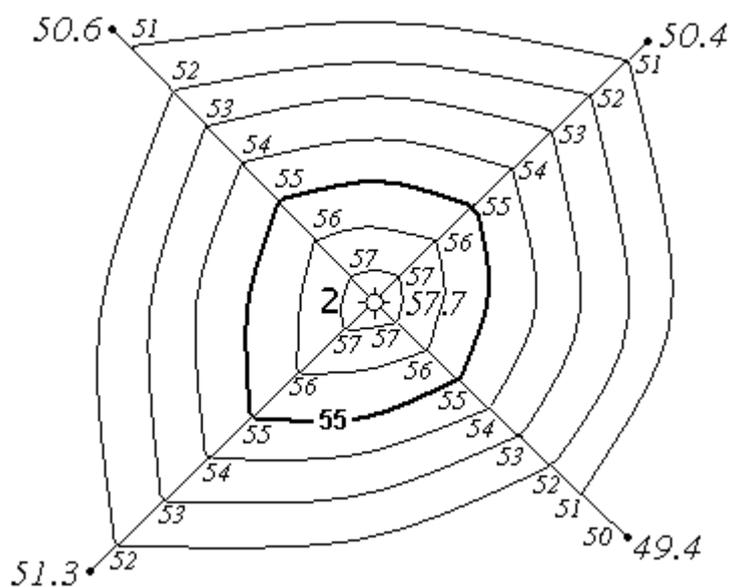


Рис. 33. Изображение рельефа горизонталями

Положение горизонталей на плане или карте определяется с помощью интерполирования. На рис. 33 приведено построение горизонталей с отметками 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57 м. Горизонтали кратные 5 или 10 м проводят на чертеже утолщенными и подписывают. Подписи наносят таким образом, чтобы верх цифр указывал сторону повышения рельефа. На рис. 33 подписана горизонталь с отметкой 55 м.

Там, где заложения большие, наносят штриховые линии (*полугоризонтали*). Чтобы сделать чертеж более наглядным, горизонтали сопровождают небольшими черточками, которые ставятся перпендикулярно горизонталям, по направлению ската (в сторону стока воды). Эти черточки называются *бергштрихи*.

3.4. Цифровые модели местности

В настоящее время в связи с повсеместным использованием в инженерной практике методов автоматизированного проектирования, а также с внедрением геоинформационных систем в различные отрасли жизнедеятельности человека всё более широкое применение находят цифровые модели местности.

Цифровая модель местности (ЦММ) – множество, элементами которого является топографо-геодезическая информация о местности. Она включает в себя:

- метрическую информацию – геодезические пространственные координаты характерных точек рельефа и ситуации;
- синтаксическую информацию для описания связей между точками – границы зданий, лесов, пашен, водоемов, дороги, водораздельные и водосливные линии, направления скатов между характерными точками на склонах и т. п.;
- семантическую информацию, характеризующую свойства объектов – технические параметры инженерных сооружений, геологическую характеристику грунтов, данные о деревьях в лесных массивах и т. п.;
- структурную информацию, описывающую связи между различными объектами – отношения объектов к какому-либо множеству: отдельные пункты железнодорожной линии, здания и сооружения населенного пункта, строения и конструкции соответствующих производств и т. п.;
- общую информацию – название участка, система координат и высот, номенклатура.

Топографическая ЦММ характеризует ситуацию и рельеф местности. Она состоит из **цифровой модели рельефа местности** (ЦМРМ) и **цифровой модели контуров (ситуации) местности** (ЦМКМ). Кроме этого ЦММ может дополняться моделью специального инженерного назначе-

ния (ЦМИН). В инженерной практике часто используют сочетание цифровых моделей, характеризующих ситуацию, рельеф, гидрологические, инженерно-геологические, технико-экономические и другие показатели.

ЦММ создаются с помощью таких современных программных комплексов как «AutoCad Land Development Desktop», «Autodesk Civil 3D», «Autodesk Map 3D» «MapInfo», «Pythagoras», «Credo», «GeoniCS» и др.

Цифровая модель местности, записанная на машинном носителе в определенных структурах и кодах представляет собой **электронную карту**.

При решении инженерно-геодезических задач на ЭВМ применяют математическую интерпретацию цифровых моделей, ее называют **математической моделью местности** (МММ). Автоматизированное проектирование на основе ЦММ и МММ сокращает затраты труда и времени в десятки раз по сравнению с использованием для этих целей бумажных топографических карт и планов.

Исходными данными для создания цифровых моделей местности являются результаты топографической съемки, данные о геологии и гидрографии местности.

По способу размещения исходной информации и правил ее обработки на ЭВМ цифровые модели местности делятся на регулярные, нерегулярные, структурные (рис. 34).

Цифровая модель местности, в которой опорные точки с известными координатами располагаются в узлах геометрических сеток различной формы, например, в виде сети квадратов или равносторонних треугольников (рис. 34, а), называется **регулярной**. Используют также регулярные ЦММ на поперечниках к магистральному ходу (рис. 34, б).

Если на участок местности имеются крупномасштабные карты и планы, то создают ЦММ в виде массива точек, расположенных через определенные интервалы на горизонталях, путем перемещения визира дигитайзера по горизонтали (рис. 34, в).

В регулярных ЦММ геоморфология местности не учитывается, поэтому их предпочтительно использовать для равнинной местности.

Цифровая модель местности, в которой точки располагаются произвольно в пределах однородных по рельефу, геологии, гидрологии участков местности без какой-либо определенной системы, но с заданной плотностью и плотностью называется **нерегулярной**.

Цифровая модель местности, которая состоит из точек с известными координатами, расставленных в вершинах переломов структурных (орографических) линий рельефа называется **структурной**.

Структурные ЦММ используют в основном для пересеченной местности. Точки структурных цифровых моделей рельефа могут располагаться:

- на основных перегибах всех структурных линий (рис. 34, г);

- в местах изменения кривизны склонов (рис. 34, д);
- вдоль скатов по линиям наибольшей крутизны в местах характерных переломов с указанием крутизны и направлений линий (рис. 34, е).

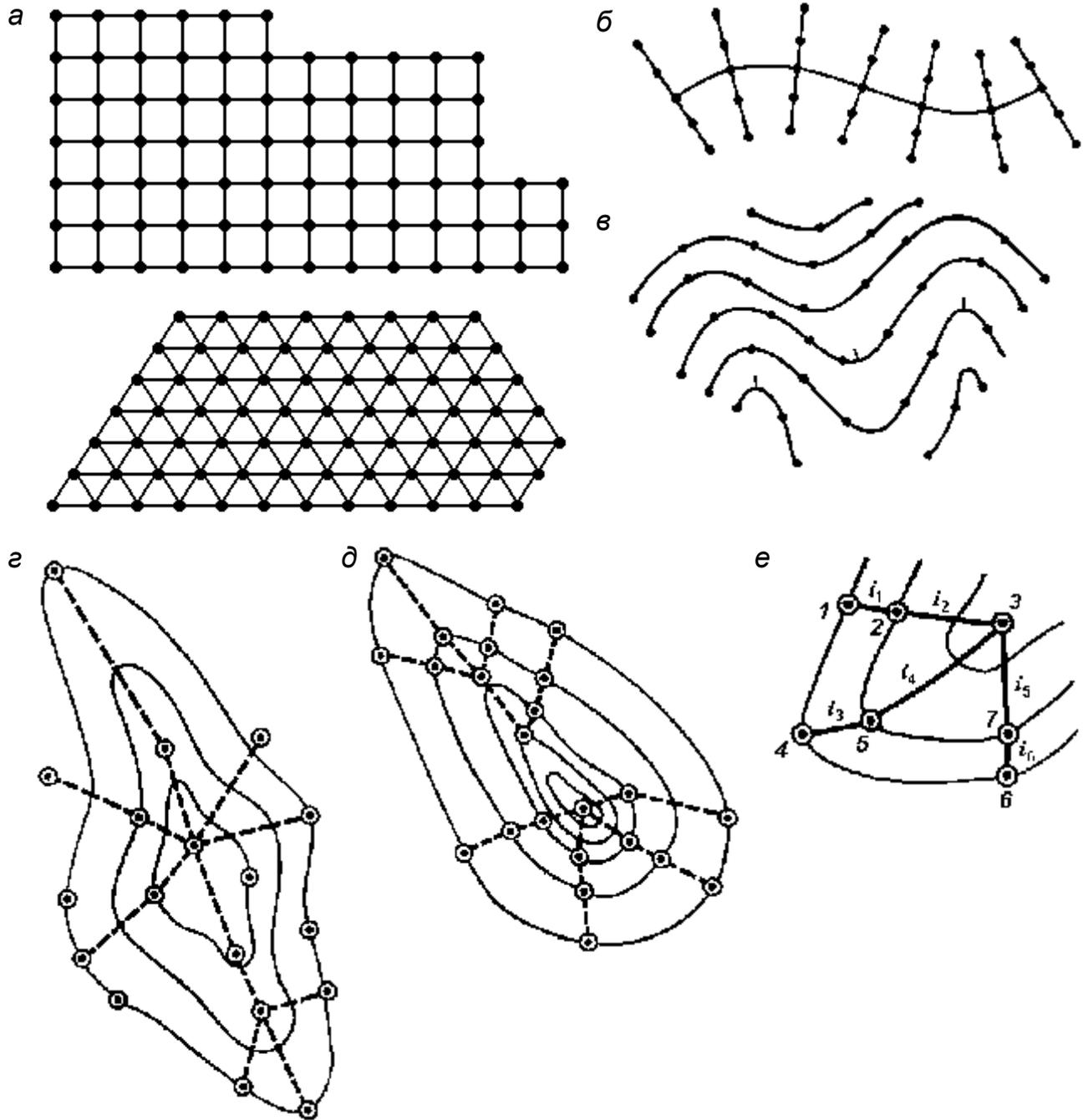


Рис. 34. Схемы цифровых моделей местности

Следовательно, тангенс угла наклона линии к горизонту называется её *уклоном*. Уклон выражают в тысячных – промиллях (‰) или в процентах (%). Например: $i = 0,020 = 20 \text{ ‰} = 2 \%$.

Для графического определения углов наклона по заданному значению заложения d , масштабу M и высоте сечения рельефа h строят график заложений (рис. 36).

Вдоль прямой линии основания графика намечают точки, соответствующие значениям углов наклона. От этих точек перпендикулярно к основанию графика откладывают в масштабе карты отрезки, равные соответствующим заложениям, а именно

$$d = h \cdot \text{ctgv} .$$

Концы этих отрезков соединяют плавной кривой (рис. 36).

Заложение линии, угол наклона которой надо определить, снимают с карты при помощи измерителя, а затем, укладывая на графике между основанием и кривой измеренный отрезок, находят соответствующее ему значение угла наклона.



Рис. 36. График заложений для углов наклона

Аналогично строят график заложений для уклонов (рис. 37).

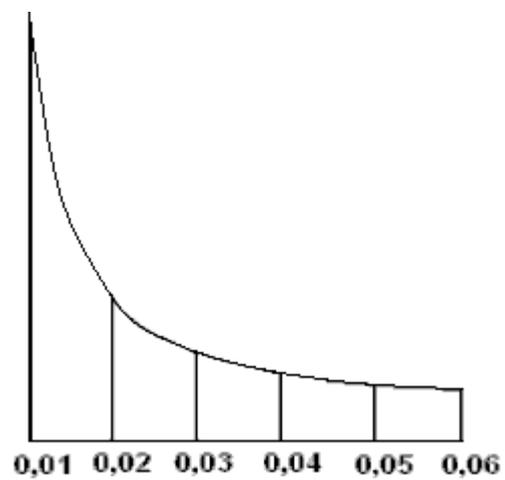


Рис. 37. График заложений для уклонов

3.5.3. Построение линии с заданным уклоном

Задача построения линии с заданным уклоном решается в проектировании трасс железных, автомобильных и других линейных сооружений. Она заключается в том, что из некоторой точки, обозначенной на карте, необходимо провести линию с заданным уклоном i по заданному направлению. Для этого сначала определяют значение заложения d , соответствующее заданным i и h . Его находят по графику заложения уклонов или вычисляют по формуле

$$d = \frac{h}{i}.$$

Далее, установив раствор измерителя равным полученному значению d , ставят одну его ножку в начальную точку K , а другой засекают ближайшую горизонталь и тем намечают точку трассы, из которой в свою очередь засекают следующую горизонталь, и т. д. (рис. 38).

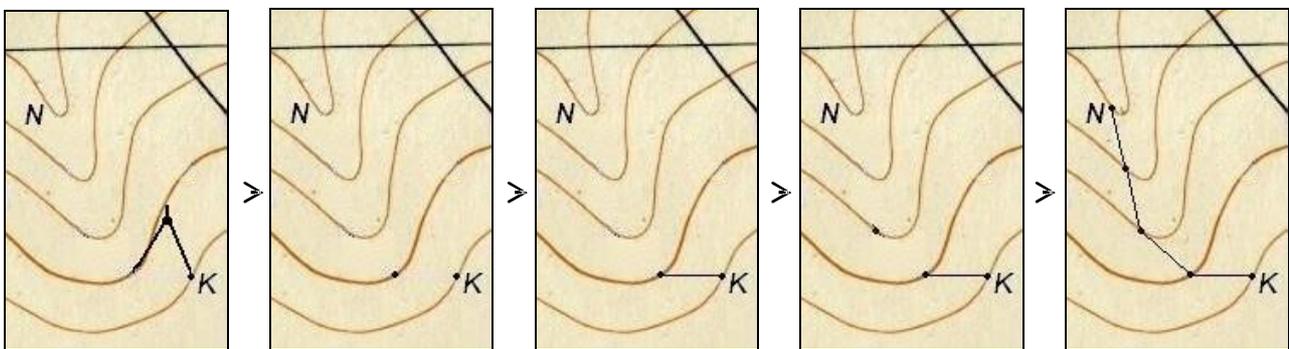


Рис. 38. Построение линии с заданным уклоном

3.5.4. Построение профиля по топографической карте

Профилем местности называют уменьшенное изображение вертикального разреза местности по заданному направлению.

Пусть требуется построить профиль местности по линии DE , указанной на карте (рис. 39). Для построения профиля на листе бумаги (как правило, используется миллиметровая бумага) проводят горизонтальную прямую и на ней, обычно в масштабе карты (плана), откладывают линию DE и точки её пересечения с горизонталями и полугоризонталями. Далее из этих точек по перпендикулярам откладывают отметки соответствующих горизонталей (на рис. 39 это отметки 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 и 82,5 м). Чтобы отобразить профиль более рельефно, отметки точек обычно откладывают в масштабе в 10 раз крупнее масштаба плана. Соединив прямыми концы перпендикуляров, получают профиль по линии DE .

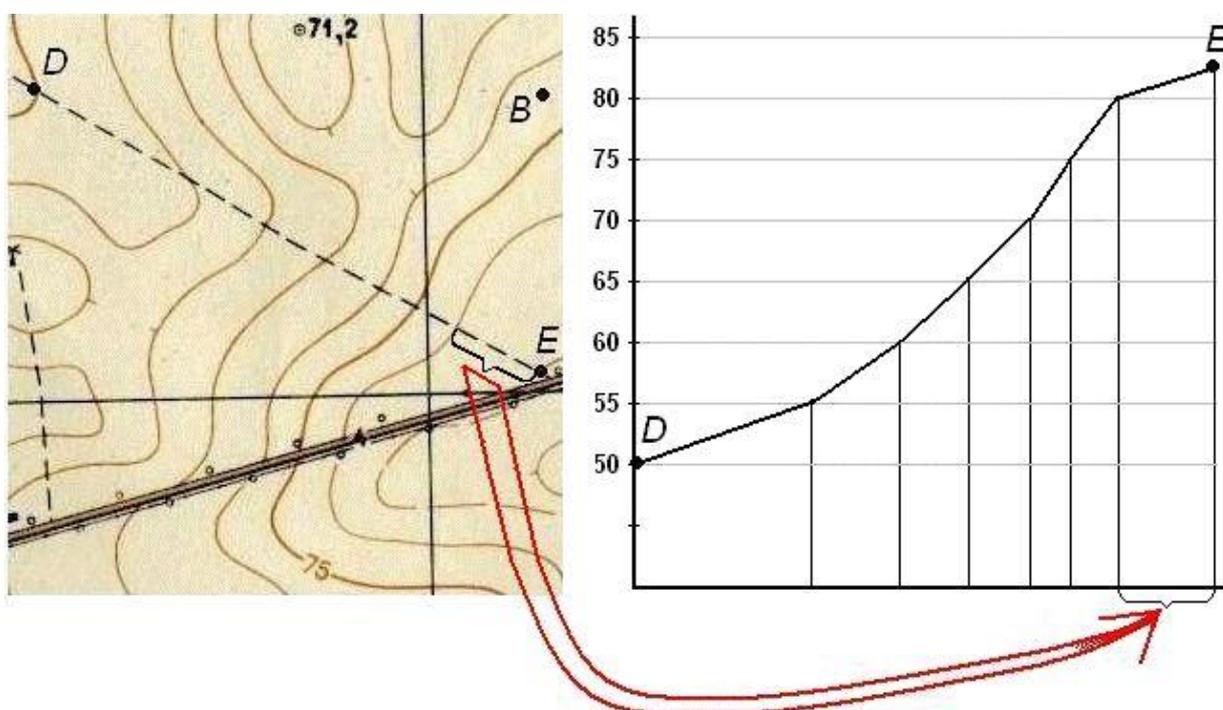
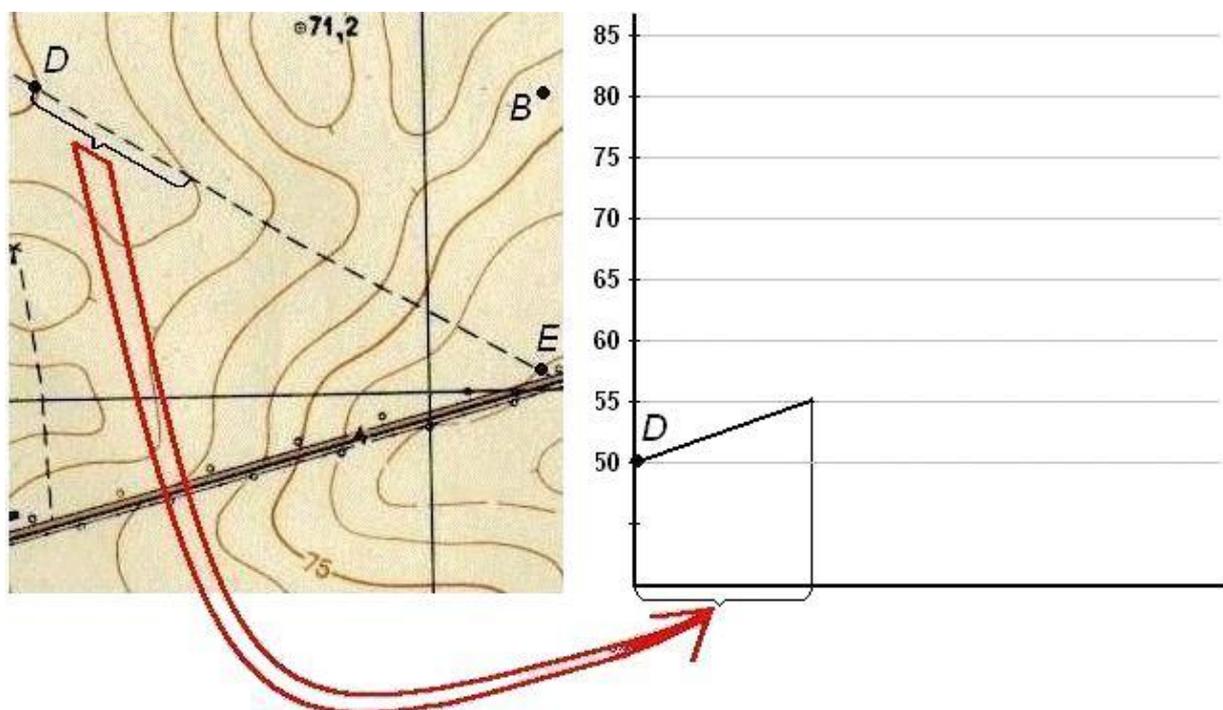


Рис. 39. Построение профиля по топографической карте

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что понимают под рельефом местности?
2. Какие бывают формы рельефа?
3. Что такое горизонталь? Каковы её основные свойства?
4. Что такое высота сечения рельефа?

5. Что называется заложением горизонталей?
6. Что такое уклон линии?
7. Как определяется нормальная высота сечения рельефа?
8. Что представляет собой цифровая модель местности и электронная карта?
9. Какие исходные данные необходимы для создания цифровых моделей местности?
10. Как классифицируются цифровые модели местности по способу размещения исходной информации и правил ее обработки на ЭВМ?
11. Как определить на карте высоту точки и крутизну ската линии?

Лекция 4

ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УГЛОВ. ТЕОДОЛИТЫ

План лекции

- 4.1. Принцип измерения горизонтального угла
- 4.2. Теодолит, его составные части
- 4.3. Классификация теодолитов
- 4.4. Основные узлы теодолита
- 4.5. Предельное расстояние от теодолита до предмета

4.1. Принцип измерения горизонтального угла

Углы обычно измеряют в градусной мере (градусы, минуты, секунды), реже – в радианной. За рубежом широко применяется градусная мера измерения углов.

При геодезических работах измеряют не углы между сторонами на местности, а их ортогональные (горизонтальные) проекции, называемые горизонтальными углами. Так, для измерения угла **ABC**, стороны которого не лежат в одной плоскости, нужно предварительно спроектировать на горизонтальную плоскость точки **A**, **B**, и **C** (рис. 40) и измерить горизонтальный угол **abc = β**.

Рассмотрим двугранный угол между вертикальными плоскостями **V₁** и **V₂**, про-

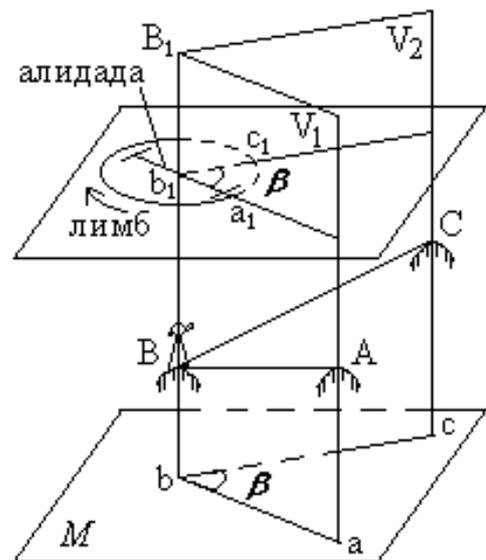


Рис. 40. Принцип измерения горизонтального угла

ходящими через стороны угла **ABC**. Угол β для данного двугранного угла является линейным. Следовательно, углу β равен всякий другой линейный угол, вершина которого находится в любой точке на отвесном ребре **BB₁** двугранного угла, а стороны его лежат в плоскости, параллельной плоскости **M**. Итак, для измерения величины угла β можно в любой точке, лежащей на ребре **BB₁** двугранного угла, допустим в точке **b₁**, установить горизонтальный круг с градусными делениями и измерить на нем дугу **a₁c₁**, заключенную между сторонами двугранного угла, которая и будет градусной мерой угла **a₁b₁c₁**, равной β , т. е. угол **abc** = β .

4.2. Теодолит, его составные части

Измерения горизонтальных проекций углов между линиями местности производят геодезическим угломерным прибором – **теодолитом**. Для этого теодолит имеет горизонтальный угломерный круг с градусными делениями, называемый **лимбом**. Стороны угла проектируют на лимб с использованием подвижной визирной плоскости **зрительной трубы**. Она образуется визирной осью трубы при её вращении вокруг горизонтальной оси. Данную плоскость поочередно совмещают со сторонами угла **BA** и **BC**, последовательно направляя визирную ось зрительной трубы на точки **A** и **C**. При помощи специального отсчетного приспособления **алидады**, которая находится над лимбом соосно с ним и перемещается вместе с визирной плоскостью, на лимбе фиксируют начало и конец дуги **a₁c₁** (см. рис. 40), беря отсчеты по градусным делениям. Разность взятых отсчетов является значением измеряемого угла β .

Лимб и алидада, используемые для измерения горизонтальных углов, составляют в теодолите горизонтальный круг. *Ось вращения алидады горизонтального круга называют основной осью теодолита.*

В теодолите также имеется **вертикальный круг с лимбом и алидадой**, служащий для измерения вертикальных проекций углов – углов наклона. Принято считать углы наклона выше горизонта положительными, а ниже горизонта – отрицательными. Лимб вертикального круга обычно наглухо скреплён со зрительной трубой и вращается вместе с ней вокруг горизонтальной оси теодолита.

Перед измерением углов центр лимба с помощью отвеса или оптического центрира устанавливают на отвесной линии, проходящей через вершину измеряемого угла, а плоскость лимба приводят в горизонтальное положение, используя с этой целью три подъемных винта **З** и цилиндрический уровень **12** (рис. 41). В результате данных действий основная ось теодолита должна совпасть с отвесной линией, проходящей через вершину измеряемого угла.

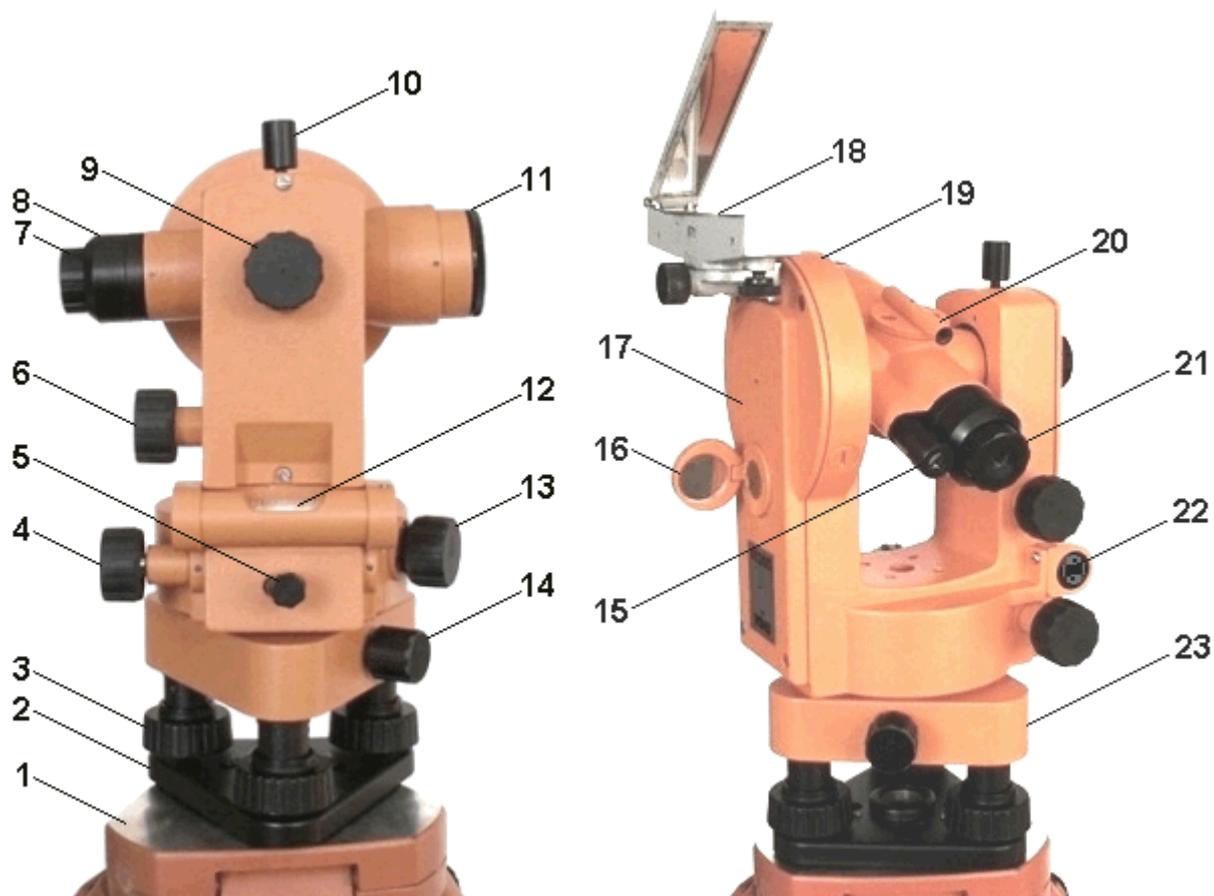


Рис. 41. Устройство теодолита 4Т30П: 1 – головка штатива; 2 – основание; 3 – подъемный винт; 4 – наводящий винт алидады; 5 – закрепительный винт алидады; 6 – наводящий винт зрительной трубы; 7 – окуляр зрительной трубы; 8 – предохранительный колпачок сетки нитей зрительной трубы; 9 – кремальера; 10 – закрепительный винт зрительной трубы; 11 – объектив зрительной трубы; 12 – цилиндрический уровень; 13 – наводящий винт лимба; 14 – закрепительный винт лимба; 15 – окуляр отсчетного микроскопа с диоптрийным кольцом; 16 – зеркальце для подсветки штрихов отсчетного микроскопа; 17 – колонка; 18 – ориентир-буссоль; 19 – вертикальный круг; 20 – визир; 21 – диоптрийное кольцо окуляра зрительной трубы; 22 – исправительные винты цилиндрического уровня; 23 – подставка

Для установки, настройки и наведения теодолита на цели в нем имеется система винтов: становой и подъемные винты, закрепительные (закрепительные) и наводящие (микрометрические) винты, исправительные (юстировочные) винты.

Становым винтом теодолит крепят к головке штатива, подъемными винтами – горизонтируют.

Закрепительными винтами скрепляют подвижные части теодолита (лимб, алидаду, зрительную трубу) с неподвижными. Наводящими винтами сообщают малое и плавное вращение закрепленным частям.

Чтобы теодолит обеспечивал получение неискаженных результатов измерений, он должен удовлетворять соответствующим геометрическим и оптико-механическим условиям. Действия, связанные с проверкой этих условий, называют **поверками**. Если какое-либо условие не соблюдается, с помощью исправительных винтов производят **юстировку** прибора.

4.3. Классификация теодолитов

В настоящее время отечественными заводами в соответствии с действующим ГОСТом 10529–96 изготавливаются теодолиты четырех типов: Т05, Т1, Т2, Т5 и Т30.

Для обозначения модели теодолита используется буква Т и цифры, указывающие угловые секунды средней квадратической ошибки однократного измерения горизонтального угла.

- По точности теодолиты подразделяются на три группы:
 - **технические** Т30, предназначенные для измерения углов со средними квадратическими ошибками до $\pm 30''$;
 - **точные** Т2 и Т5 – до $\pm 2''$ и $\pm 5''$;
 - **высокоточные** Т05 и Т1 – до $\pm 1''$.

ГОСТом 10529 – 96 предусмотрена модификация точных и технических теодолитов. Так, например, теодолит Т5 должен изготавливаться в двух вариантах: с цилиндрическим уровнем при алидаде вертикального круга и с компенсатором, заменяющим этот уровень. Теодолит с компенсатором при вертикальном круге обозначается Т5К.

Технические и эксплуатационные характеристики теодолитов постоянно улучшаются. Шифр обновленных моделей начинается с цифры, указывающей на соответствующее поколение теодолитов: 2Т2, 2Т5К, 3Т5КП, 3Т30, 3Т2, 4Т30П и т. д.

- По конструкции, предусмотренной ГОСТом 10529–96 типы теодолитов делятся на повторительные и неповторительные.

У **повторительных** теодолитов лимб имеет закрепительный и наводящий винты и может вращаться независимо от вращения алидады.

Неповторительная система осей предусмотрена у высокоточных теодолитов.

4.4. Основные узлы теодолита

4.4.1. Отсчетные приспособления

Отсчетные приспособления служат для отсчитывания делений лимба и оценки их долей. Они делятся на штриховые (теодолит Т30) и шкаловые (2Т30, Т5, 2Т5) микроскопы (рис.42) и микрометры (теодолит Т2).

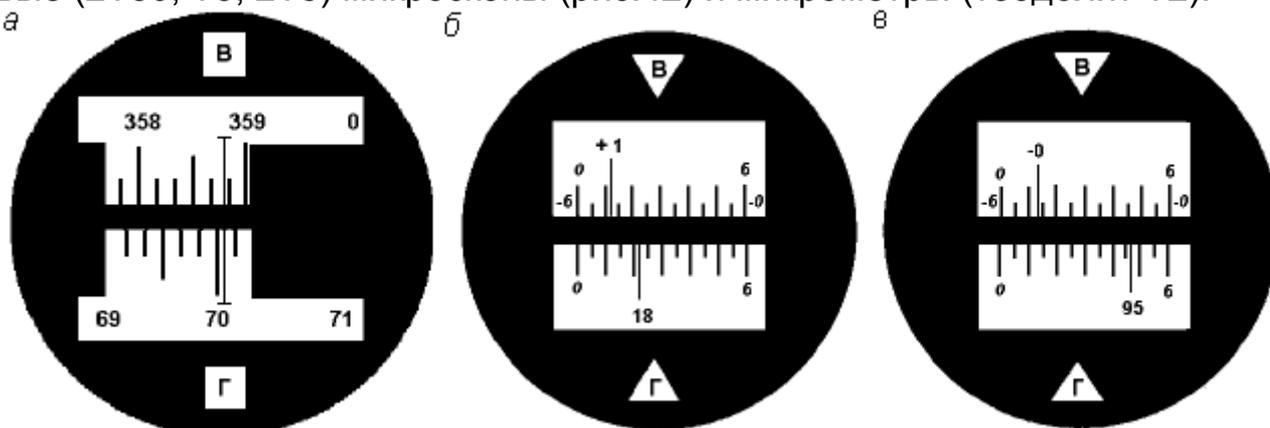


Рис. 42. Поле зрения отсчетных устройств: а – штрихового микроскопа с отсчетами по вертикальному кругу $358^{\circ}48'$, по горизонтальному $70^{\circ}04'$; б – шкалового микроскопа с отсчетами: по вертикальному кругу $1^{\circ}11,5'$, по горизонтальному $18^{\circ}22'$; в – по вертикальному кругу $-0^{\circ}46,5'$ по горизонтальному $-95^{\circ}47'$.

В штриховом микроскопе теодолита Т30 в середине поля зрения виден штрих, относительно которого осуществляется отсчет по лимбу (рис. 42, а). Перед отсчетом по лимбу необходимо определить цену деления лимба. В теодолите Т30 цена деления лимба составляет 10 угловых минут, так как градус разделен на шесть частей. Число минут оценивается на глаз в десятых долях цены деления лимба. Точность отсчета составляет $1'$.

В шкаловом микроскопе теодолита 2Т30 в поле зрения видна шкала, размер которой соответствует цене деления лимба (рис. 42, б, в). Для теодолита технической точности размер шкалы и цена деления лимба равны $60'$. Шкала разделена на двенадцать частей и цена ее деления составляет 5 угловых минут. Если перед числом градусов знака минус нет, отсчет производится по шкале от 0 до 6 в направлении слева направо (рис. 42, б). Если перед числом градусов стоит знак минус, то минуты отсчитываются по шкале вертикального круга от -0 до -6 в направлении справа налево (рис. 42, в). Десятые доли цены деления шкалы берутся на глаз с точностью до $30''$.

4.4.2. Уровни

Уровни служат для приведения отдельных осей и плоскостей геодезических приборов в горизонтальное или вертикальное положение. Они состоят из ампулы, оправы и регулировочного приспособления.

В зависимости от формы ампулы уровни бывают цилиндрические и круглые. Ампулу цилиндрического уровня, внутренняя поверхность которой отшлифована по дуге круга радиуса R , заполняют нагретым серным эфиром или спиртом и запаивают. Свободную от жидкости часть ампулы, заполненную парами жидкости, называют пузырьком уровня. На внешнюю поверхность рабочей части ампулы через 2 мм наносят штрихи. Точку O , расположенную в середине центрального деления ампулы, называют нуль-пунктом уровня.

Прямая uu_1 – касательная к внутренней поверхности ампулы в нуль-пункте O , называется осью цилиндрического уровня (рис. 43). При любом положении ампулы уровня его пузырек будет всегда занимать наивысшее положение, а касательная, проведенная к самой высокой точке O' пузырька, будет горизонтальна. Если совместить точки O и O' , то ось цилиндрического уровня тоже займет горизонтальное положение.

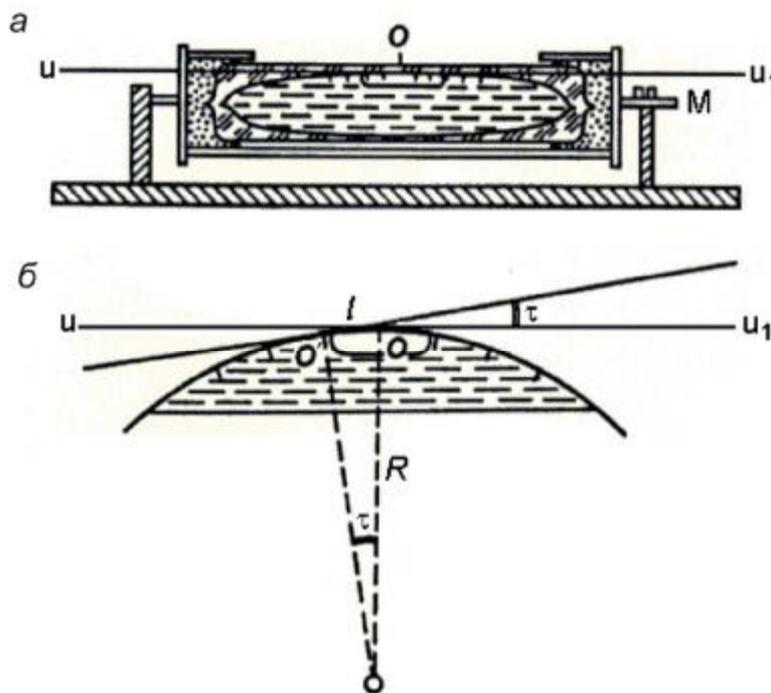


Рис. 43. Цилиндрический уровень:
а – продольный разрез; б – разрез

Центральный угол τ , соответствующий одному делению ампулы, определяет чувствительность уровня, т. е. способность пузырька быстро и

точно занимать в ампуле наивысшее положение. Величину этого угла называют ценой деления уровня и рассчитывают по формуле

$$\tau = \frac{l}{R} \rho'',$$

где R – радиус внутренней поверхности ампулы, мм; ρ'' – величина радиана в секундах; l – длина деления ампулы, мм.

Чем больше R , тем меньше цена одного деления и точнее уровень. У точных теодолитов цена деления уровня колеблется в пределах 15–40" на 2 мм, а у технических – в пределах 45–60" на 2 мм.

4.4.3. Зрительные трубы

Для наблюдения удаленных предметов в теодолите используют зрительную трубу. Геодезические приборы, как правило, снабжают **трубой Кеплера**, которая дает увеличенное перевернутое изображение. Такие трубы называют астрономическими.

Оптика простейших зрительных труб состоит из двух собирающих линз (рис. 44): **объектива** (1), направленного на предмет, и **окуляра** (2). Изображение всегда получается при прохождении лучей через объектив, действительным, обратным и уменьшенным. Чтобы увеличить его, в трубу вводят окуляр, действующий как лупа. Получаем мнимое, увеличенное изображение.

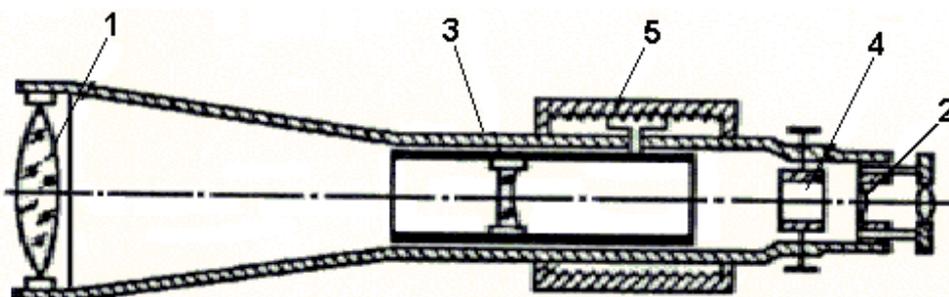


Рис. 44. Зрительная труба: 1 – объектив; 2 – окуляр; 3 – фокусирующая линза; 4 – сетка нитей; 5 – кремальерный винт (кольцо)

Так как при визировании на разные расстояния изображение будет перемещаться, то для получения ясного изображения необходимо, чтобы окуляр мог перемещаться относительно объектива вдоль оси трубы.

Новейшие геодезические трубы снабжаются трубой постоянной длины, в которой объектив и сетка нитей закреплена в одной оправе. Фокусирование производится при помощи **фокусирующей линзы** (3) – рассеивающего стекла, перемещающегося в трубе между объективом и сет-

кой нити (4) при вращении особого **кремальерного винта** или кольца (5), охватывающего зрительную трубу около её окуляра.

Простые зрительные трубы обладают двумя существенными недостатками: сферической и хроматической аберрациями.

Явление **сферической аберрации** вызывается тем, что лучи света после их преломления в стекле не собираются в одной и той же точке, отчего изображения предметов получаются неясными и расплывчатыми. Сферической аберрации особенно подвержены лучи, падающие на края линзы. Бесцветные лучи света, преломляясь в стекле, разлагаются на цвета и окрашивают края изображения в цвета радуги. Это явление называется **хроматической аберрацией**.

Для ослабления сферической аберрации берут линзы разной кривизны, а для устранения хроматической аберрации линзы устанавливают на некотором расстоянии друг от друга.

Полная установка зрительной трубы для наблюдения складывается из установки её по глазу и по предмету.

Сначала устанавливают окуляр по глазу, для чего направляют трубу на какой-либо светлый фон и перемещают диоптрийное кольцо окуляра так, чтобы нити сетки были видны резко очерченными. Затем наводят трубу на предмет и добиваются четкого его изображения кремальерным винтом, т. е. фокусируют.

После этого устраняют параллакс сетки нитей. Точка пересечения нитей не должна сходить с наблюдаемой точки при передвижении глаза относительно окуляра. Если она сходит с наблюдаемой точки, то такое явление называется параллаксом. Он происходит от несовпадения плоскости изображения предмета с плоскостью сетки нитей и устраняется небольшим поворотом кремальеры.

При оценке качества зрительной трубы существенное значение имеют следующие показатели: увеличение, поле зрения и яркость трубы.

Увеличение трубы есть отношение угла, под которым в окуляре видно изображение предмета, к углу, под которым этот же предмет наблюдают невооруженным глазом.

Допустим, что глаз рассматривает изображение предмета в трубе из центра окуляра O_1 под углом β , а сам предмет из центра объектива O под углом α (рис. 45).

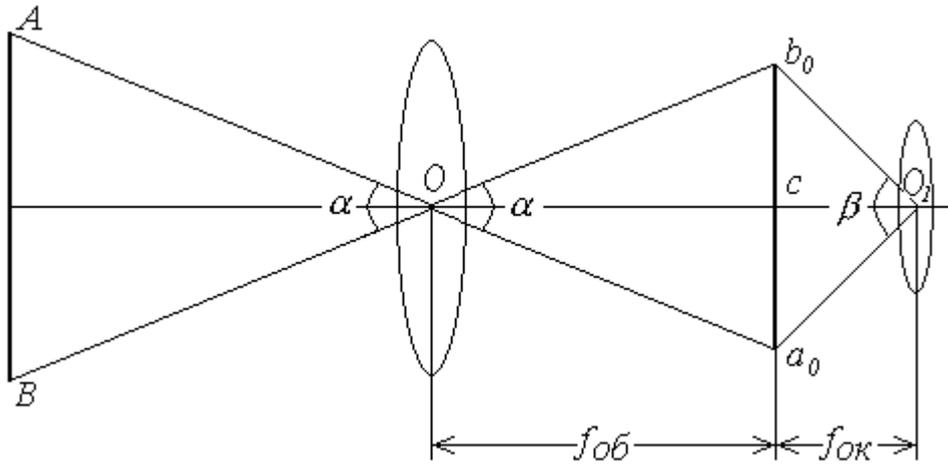


Рис. 45. Увеличение зрительной трубы

При наблюдении на большие расстояния можно считать, что изображение предмета в трубе удалено как от объектива, так и от окуляра на величину их фокусных расстояний, т. е. $Oc = f_{об}$ и $cO_1 = f_{ок}$. Из треугольников $a_0O_1b_0$ и a_0Ob_0 имеем

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{ca_0}{f_{ок}} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{ca_0}{f_{об}}.$$

Вследствие малости углов α и β отношение тангенсов можно заменить отношением углов, т. е.

$$\Gamma = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{f_{об}}{f_{ок}}.$$

Следовательно, можно сказать, что увеличение трубы есть отношение фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра.

Увеличение зрительных труб технических теодолитов Т30 равно 20^\times , точных теодолитов Т5 колеблется в пределах $25\text{--}30^\times$.

Поле зрения – это коническое пространство, которое можно видеть через трубу при неподвижном её положении. Оно измеряется углом ε , вершина которого находится в оптическом центре объектива, а стороны опираются на диаметр кольца диафрагмы сетки нитей

$$\varepsilon = \frac{2292'}{\Gamma}.$$

Из этой формулы видно, что чем больше увеличение, тем меньше поле зрения. Поэтому для быстрого наведения на предмет наблюдения зрительную трубу снабжают визирной трубкой или оптическим прицелом.

Яркость изображения трубы – это то количество света, которое глаз получает от одного квадратного миллиметра площади видимого изображения за единицу времени. Яркость изображения прямо пропорциональна квадрату отверстия объектива и обратно пропорциональна квадрату увеличения трубы. В связи с этим при геодезических работах не следует применять приборы с трубами большого увеличения, так как они имеют небольшую яркость изображения.

4.5. Предельное расстояние от теодолита до предмета

Невооруженный глаз может различить две удаленные точки в том случае, если они видны под углом зрения не менее $1'$. При меньших углах зрения точки перестают различаться и сливаются в одну. Поэтому ошибку визирования невооруженным глазом можно полагать равной $60''$. Данное значение угла зрения называют критическим.

При рассматривании изображения в зрительную трубу погрешность визирования уменьшается пропорционально увеличению трубы и принимается $\pm 60''/\Gamma$.

Если увеличение трубы известно, можно рассчитать предельное расстояние от прибора до наблюдаемого предмета (рис. 46).

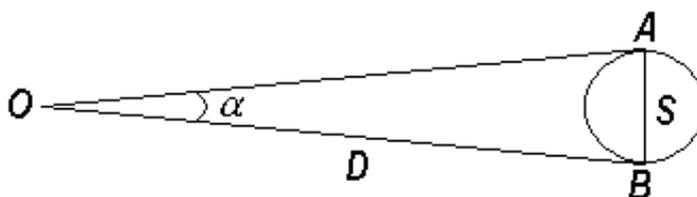


Рис. 46. Предельное расстояние от прибора до предмета

Зная Γ и диаметр S , например, вехи, можно, рассматривая S как дугу радиуса D , написать: $S = D \cdot \alpha$. Тогда, учитывая предельный угол зрения при рассматривании изображения в трубу $60''/\Gamma$, получим:

$$D = \frac{S}{\alpha}; \quad \alpha_{пр} = \frac{60''}{\Gamma}; \quad D = \frac{S}{\frac{60''}{\Gamma}} = 206265'' \cdot \frac{S}{60''};$$

$$D_{пр} = 206265'' \cdot S \cdot \frac{\Gamma}{60''} = 3438 \cdot S \cdot \Gamma.$$

При $\Gamma = 20\times$ и $S = 3$ см $D_{пр} \approx 2$ км.

Вычисленное расстояние надо считать приблизительным, так как указанная формула не учитывает рефракцию, прозрачность воздуха и другие условия, влияющие на наблюдения.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем заключается назначение теодолита.
2. Назовите основные части теодолита.
3. Какие бывают отсчетные приспособления в теодолитах?
4. В чем заключается назначение цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга.
5. В чем назначение зрительной трубы теодолита.
6. Приведите характеристики зрительной трубы.
7. Какие существуют установки зрительной трубы при наблюдениях?

Лекция 5 **ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН ЛИНИЙ**

План лекции

- 5.1. *Виды измерений линий.*
- 5.2. *Приборы непосредственного измерения линий.*
- 5.3. *Компарирование лент и рулеток.*
- 5.4. *Вешение линий.*
- 5.5. *Порядок измерения линий штриховой лентой.*
- 5.6. *Вычисление горизонтальной проекции наклонной линии местности.*
- 5.7. *Косвенные измерения длин линий.*
- 5.8. *Параллактический способ измерения расстояний.*

5.1. Виды измерений линий

Измерения линий на местности могут выполняться непосредственно, путем откладывания мерного прибора в створе измеряемой линии, с помощью специальных приборов дальномеров и косвенно. Косвенным методом измеряют вспомогательные параметры (углы, базисы), а длину вычисляют по формулам.

5.2. Приборы непосредственного измерения линий

Для измерения длин линий посредством откладывания мерного прибора используют стальные мерные ленты, которые обычно изготавлива-

ют из ленточной углеродистой стали. В геодезической практике чаще всего применяются штриховые и шкаловые ленты.

Штриховые ленты (рис. 47, а) имеют длину 20 и 24 м, ширину 15–20 мм и толщину 0,3–0,4 мм.

На ленте нанесены метровые деления, обозначенные прикрепленными бляшками, и дециметровые деления, обозначенные отверстиями. Метровые деления на обеих сторонах оцифрованы. Счет оцифровки делений ведется на одной стороне от одного конца ленты, а на другом – от другого конца. За длину ленты принимают расстояние между штрихами, нанесенными на крюках у концов ленты. К крюкам приделаны ручки. К ленте прилагается 6 или 11 шпилек на кольцо. Шпильки сделаны из стальной проволоки диаметром 5–6 мм и длиной 30–40 см. В нерабочем положении ленту наматывают на кольцо (рис. 47, в).

Шкаловая лента (рис. 47, б) выпускается длиной 20–24 м, шириной 6–10 мм и толщиной 0,15–0,20 мм. На обоих концах ленты, в пределах второго дециметра, имеются миллиметровые шкалы длиной по 100 мм каждая.

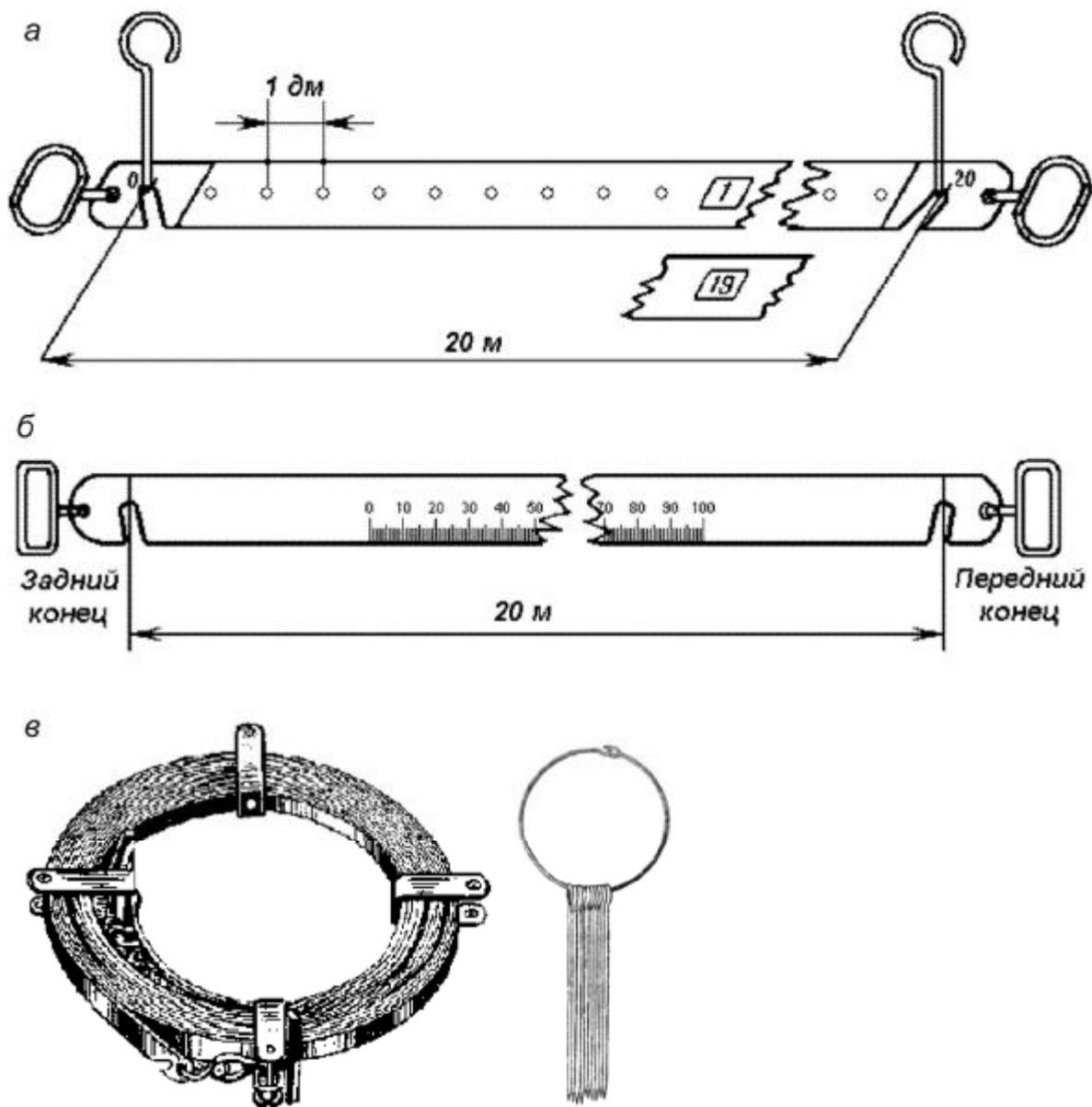


Рис. 47. Мерные ленты

Для измерения небольших расстояний применяют стальные и тесьмяные рулетки длиной 5, 10, 20, 50 м. Деления на рулетках нанесены на одной стороне через 1 см и редко через 1 мм. Свернутая рулетка помещается в металлический или пластмассовый корпус.

5.3. Компарирование мерных лент и рулеток

Мерные ленты и рулетки перед измерением ими линий должны быть проверены. Данная проверка называется **компарированием** и состоит в установлении действительной длины мерного прибора путем его сравнения с образцовым прибором, длина которого точно известна.

Для компарирования штриховых лент за образцовый мерный прибор принимают одну из лент, имеющих на производстве, длину которой выверяют в лаборатории Государственного надзора за стандартами и измерительной техникой Государственного комитета стандартов РФ, и пользуются ею при сравнении с рабочими лентами. Компарирование шкаловых лент производят на специальных приборах, называемых стационарными компараторами.

Простейший способ компарирования штриховых лент состоит в следующем. На горизонтальной поверхности, например, на полу, укладывают образцовую ленту. Рядом с ней кладут проверяемую ленту так, чтобы их края касались друг друга, а нулевые штрихи совмещались. Жестко закрепив концы с нулевыми штрихами, ленты натягивают с одинаковой силой и измеряют миллиметровой линейкой величину несовпадения конечных штрихов на других концах лент. Данная величина показывает на сколько миллиметров рабочая лента короче или длиннее образцовой и называется поправкой за компарирование Δl .

Длина проверяемой 20-метровой ленты не должна отличаться от длины образцовой ленты более чем на ± 2 мм. В противном случае в результаты измерения линий вводят поправки. При этом, выполняя измерения линий рабочей лентой, полагают, что её длина равняется 20 м. Поправки определяют по формуле

$$\Delta d = \frac{D}{20} \cdot \Delta l,$$

где D – длина измеренной линии.

Поправку вычитают из результатов измерения, когда рабочая лента короче образцовой, и прибавляют, когда она длиннее.

5.4. Вешение линий

Прямую линию на местности обычно обозначают двумя вехами, установленными на её концах. Если длина линии превышает 100 м или на каких-то её участках не видны установленные вехи, то с целью удобства и повышения точности измерения её длины используют дополнительные вехи. Их устанавливают в воображаемой отвесной плоскости, проходящей через данную линию. Эту плоскость называют створом линии. Установка вех в створ данной линии называется **вешением** (рис. 48).

Вешение линий может производиться на глаз, с помощью полевого бинокля или зрительной трубы прибора. Вешения обычно ведут «на себя». Наблюдатель становится на провешиваемой линии у вехи **А** (рис. 48), а рабочий по его указанию ставит веху в точку **С** так, чтобы она закрыва-

ла собой веху **В**. Таким же образом последовательно устанавливают вехи в точках **Д** и **Е**. Установка вех в обратном направлении (от себя), является менее точной, так как ранее выставленные вехи закрывают видимость на последующие. Более точно вехи в створ выставляют по теодолиту, установленному в точке **А** и сориентированному на веху **В**.

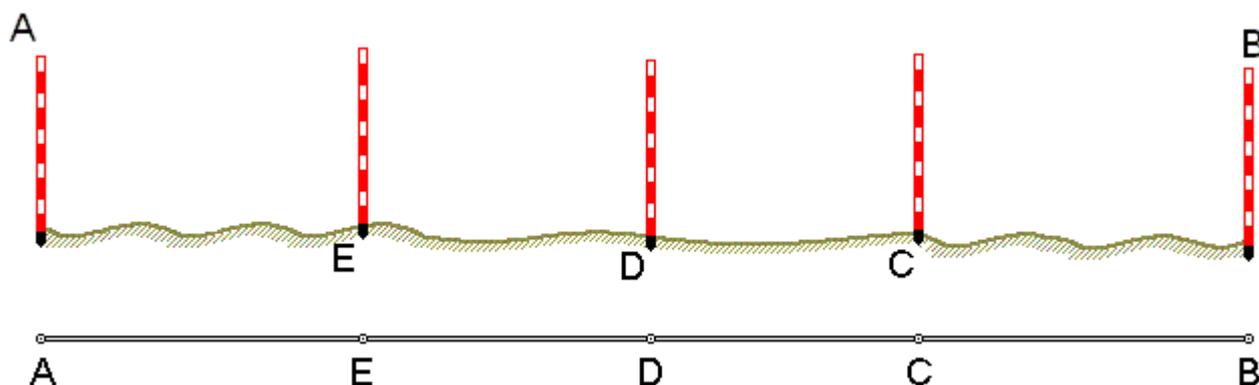


Рис. 48. Вешение линии

5.5. Порядок измерения линий штриховой лентой

Измерение линий на местности штриховыми лентами производят двое рабочих. По направлению измерения один из них считается задним, второй – передним. Ленту аккуратно разматывают с кольца. Её оцифровка должна возрастать по ходу измерения. Для закрепления мерной ленты в створе линии используется 6 шпилек. Перед началом измерения 5 шпилек берет передний мерщик и одну – задний. Задний мерщик совмещает с началом линии нулевой штрих ленты. Используя прорезь в ленте, закрепляет шпилькой её конец рядом с колышком, обозначающим начальную точку линии (рис. 49, а). Передний мерщик, имея в руке 5 шпилек, по указанию заднего мерщика, встряхнув ленту, натягивает её в створе линии и фиксирует первой шпилькой передний конец ленты. Затем задний мерщик вынимает свою шпильку из земли, вешает её на кольцо, и оба мерщика переносят ленту вперед вдоль линии. Дойдя до воткнутой в землю передним мерщиком шпильки, задний мерщик закрепляет на ней свой конец ленты, а передний, натянув ленту, закрепляет её передний конец следующей шпилькой (рис. 49, б). В таком порядке мерщики укладывают ленту в створе линии 5 раз. После того как передний мерщик зафиксирует пятой шпилькой свой конец ленты, задний мерщик передает ему кольцо с пятью шпильками, которые он собрал в процессе измерения (рис. 49, в). Число таких передач (т. е. отрезков по 100 м при длине ленты в 20 м) записывают в журнале измерений. Последний измеряемый остаток линии обычно меньше полной длины ленты. При опре-

деления его длины метры и дециметры отсчитывают по ленте, а сантиметры оценивают на глаз (рис. 49, е).

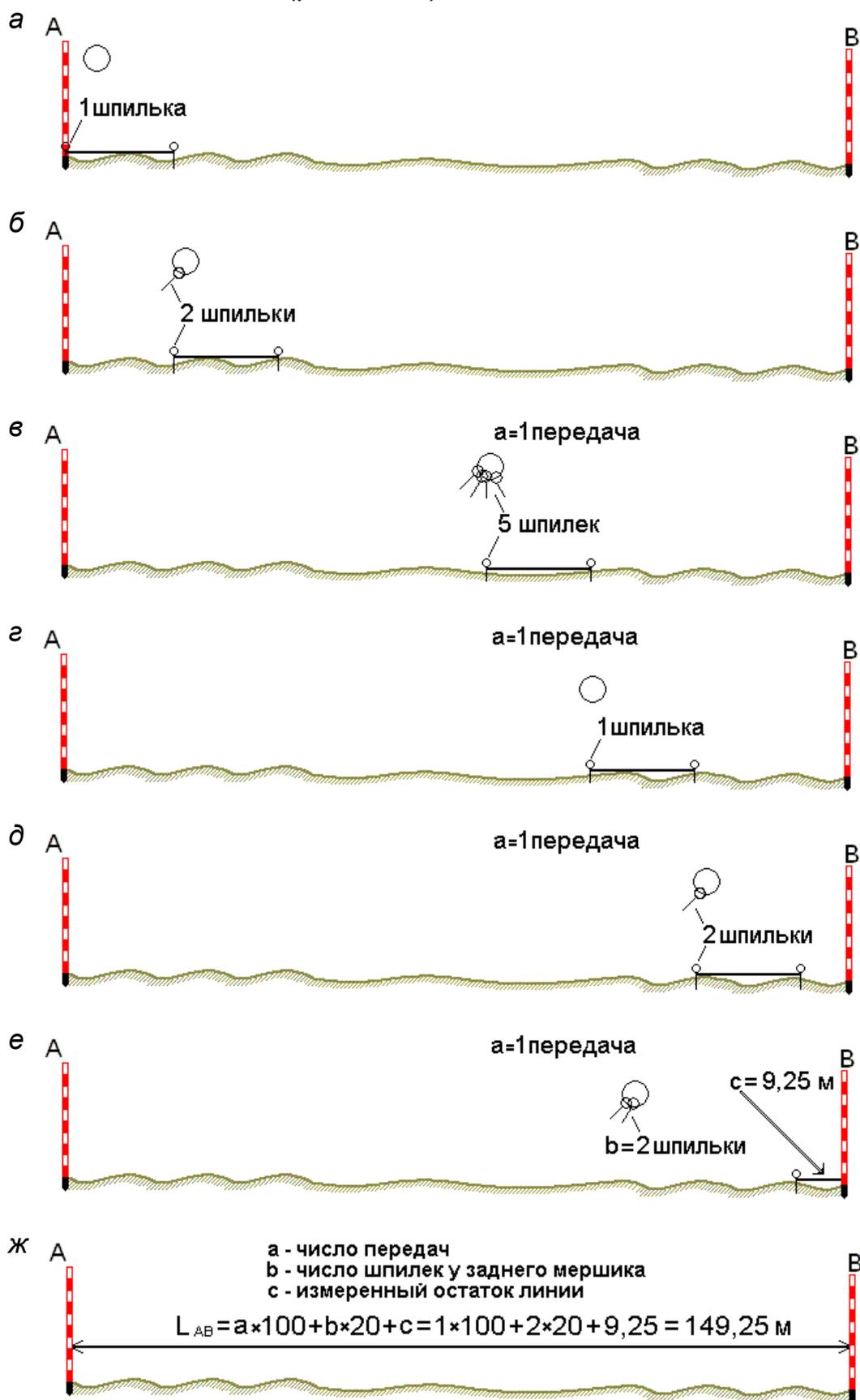


Рис. 49. Измерение линии мерной лентой

Измеренная длина линии D вычисляется по формуле

$$D = 100 \cdot a + 20 \cdot b + c,$$

где a – число передач шпилек; b – число шпилек у заднего мерщика на кольце; c – остаток.

Для контроля линию измеряют вторично 24-метровой или той же 20-метровой лентой в обратном направлении. За окончательный результат принимают среднее арифметическое из двух измерений, если их расхождение не превышает:

- 1/3000 части от длины линии при благоприятных условиях измерений;
- 1/2000 при средних условиях измерений;
- 1/1000 при неблагоприятных условиях измерений.

5.6. Вычисление горизонтальной проекции наклонной линии местности

При создании планов местности вычисляют горизонтальную проекцию каждой линии, т. е. её горизонтальное проложение S .

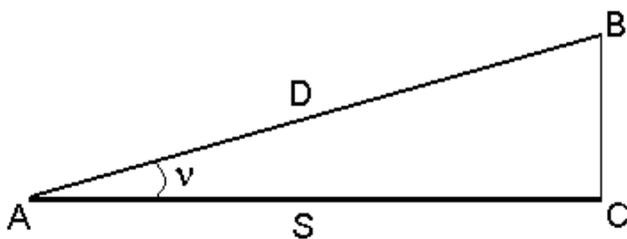


Рис. 50. Горизонтальная проекция линии

Если линия AB (рис. 50) наклонена к горизонту под углом v , то горизонтальное проложение рассчитывают по формуле

$$S = D \cdot \cos v,$$

где D – длина измеренной наклонной линии AB ; v – угол наклона.

Иногда для определения горизонтального проложения используют поправку за наклон

$$\Delta v = D - S = D - D \cdot \cos v = D(1 - \cos v) = 2D \cdot \sin^2 \frac{v}{2},$$

тогда

$$S = D - \Delta v.$$

Поправку за наклон вводят при углах наклона более 1° . Углы наклона измеряют теодолитом.

5.7. Косвенные измерения длин линий

При измерении расстояний лентой или рулеткой встречаются случаи, когда местное препятствие (река, овраг, здание, дорога и т. п.) делает

непосредственное измерение невозможным. Тогда применяют косвенные методы определения расстояний.

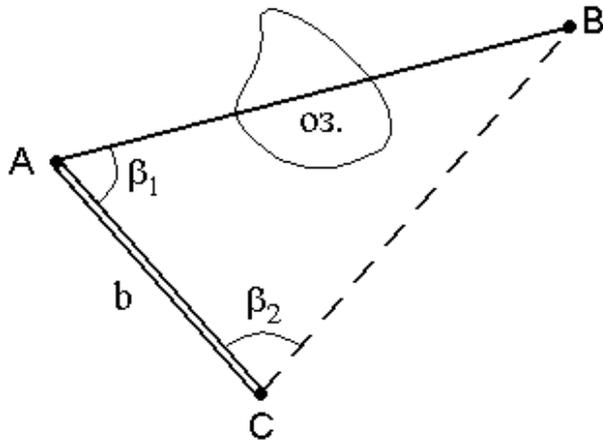


Рис. 51. Косвенное измерение расстояния через озеро

Различают три случая определения недоступных расстояний.

1. При взаимной видимости точек разбивают базис b и измеряют горизонтальные углы β_1 и β_2 (рис. 51).

Для определения расстояния AB используют теорему синусов

$$AB = \frac{b \cdot \sin \beta_2}{\sin(\beta_1 + \beta_2)}$$

2. При взаимной невидимости точек (рис. 52) выбирают точку C , из которой видны точки A и B , и измеряют расстояния S_1 , S_2 и угол β .

Используя теорему косинусов, находят расстояние AB

$$AB^2 = S_1^2 + S_2^2 - 2S_1S_2 \cos \beta$$

3. Если обе точки измеряемого расстояния недоступны (рис. 53), то разбивают базис b и из точек C и D измеряют углы β , γ , δ , τ .

По теореме синусов дважды для контроля находят расстояние AB

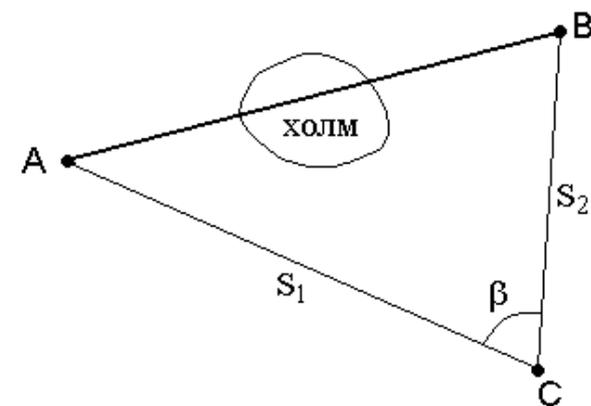


Рис. 52. Косвенное измерение расстояния через холм

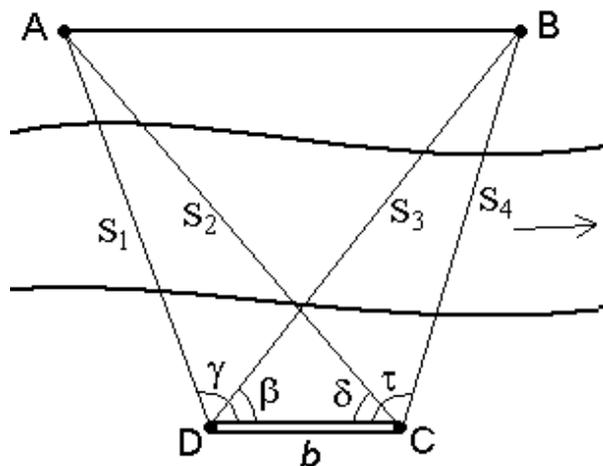


Рис. 53. Косвенное измерение расстояний если недоступны обе точки

$$S_1 = \frac{b \cdot \sin \delta}{\sin(\gamma + \delta)}$$

$$S_2 = \frac{b \cdot \sin \gamma}{\sin(\gamma + \delta)}$$

$$S_3 = \frac{b \cdot \sin \tau}{\sin(\beta + \tau)}$$

$$S_4 = \frac{b \cdot \sin \beta}{\sin(\beta + \tau)}$$

$$AB^2 = S_1^2 + S_3^2 - 2S_1S_3 \cos(\gamma - \beta) =$$

$$= S_2^2 + S_4^2 - 2S_2S_4 \cos(\tau - \delta).$$

5.8. Параллактический способ измерения расстояний

Этот способ основан на решении треугольника ABC, в котором для определения расстояния S с высокой точностью измеряют перпендикулярную измеряемой линии малую сторону l , называемую базисом, и противолежащий ей острый параллактический β (рис. 54).

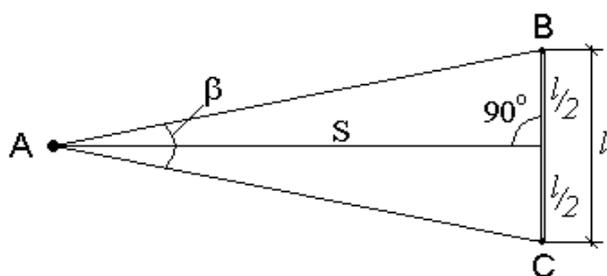


Рис. 54. Параллактический способ измерения расстояний

Расстояние S вычисляют по формуле

$$S = \frac{l}{2} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}.$$

Измеряя расстояние этим способом, сразу получают горизонтальное проложение, поэтому введение поправок за наклон линии не требуется.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называется вешением линии?
2. Что такое створ линии?
3. Какие приборы применяются для непосредственного измерения расстояний?
4. Что такое компарирование мерных приборов?
5. Как измеряются линии стальной мерной штриховой лентой?
6. Как приводятся наклонные расстояния к горизонту?
7. От чего зависит точность измерения линии мерной лентой?

Лекция 6

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН ЛИНИЙ ДАЛЬНОМЕРАМИ

План лекции

- 6.1. Физико-оптические мерные приборы.
- 6.2. Нитяной оптический дальномер.
- 6.3. Определение горизонтальных проложений линий, измеренных нитяным дальномером.
- 6.4. Определение коэффициента дальномера K .
- 6.5. Принцип измерения расстояний электромагнитными дальномерами.
- 6.6. Способы съемки ситуации.

6.1. Физико-оптические мерные приборы

Второй способ измерения длин линий заключается в использовании физико-оптических приборов. Длину линии определяют как функцию угла, под которым виден базис (оптические дальномеры), или как функцию времени и скорости распространения электромагнитных волн между конечными точками измеряемой линии (электромагнитные дальномеры).

Достоинством физико-оптических дальномеров является быстрота измерений, высокая точность и возможность измерения больших расстояний без подготовки трассы: нужна лишь оптическая видимость между конечными точками линии.

Идея оптических дальномеров основана на решении параллактического треугольника (рис. 55), в котором по малому (параллактическому) углу β и противоположному ему катету (базе) B определяют расстояние D по формуле

$$D = B \cdot \operatorname{ctg} \beta .$$

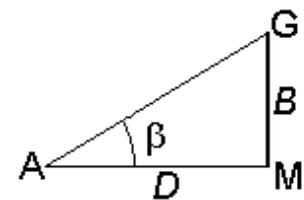


Рис. 55. Параллактический треугольник

Одну из величин (B -или β) принимают постоянной, а другую измеряют. В зависимости от этого различают оптические дальномеры с постоянной базой и переменным углом или с постоянным углом и переменной базой.

6.2. Нитяный оптический дальномер

Наиболее распространенным является нитяный дальномер с постоянным параллактическим углом. Он весьма прост по устройству и имеется в зрительных трубах всех геодезических приборов. Сетка нитей таких труб, кроме основных вертикальной и горизонтальной нитей, имеет дополнительные штрихи (нити), называемые дальномерными. С их помощью по дальномерной рейке определяют расстояние D между точками местности (рис. 56)

$$D = D' + f + \delta,$$

где D' – расстояние от переднего фокуса объектива до рейки, f – фокусное расстояние объектива, δ – расстояние от оси вращения теодолита до объектива.

Рассмотрим подобные треугольники ABF и a_1b_1F (рис. 56)

$$\frac{a_1b_1}{AB} = \frac{ab}{AB} = \frac{f}{D'}$$

где $ab = P$ – расстояние между дальномерными нитями, $AB = n$ – число сантиметровых делений между дальномерными нитями на рейке. Тогда

$$D' = \frac{f}{P}n \rightarrow D = D' + f + \delta = \frac{f}{P}n + f + \delta.$$

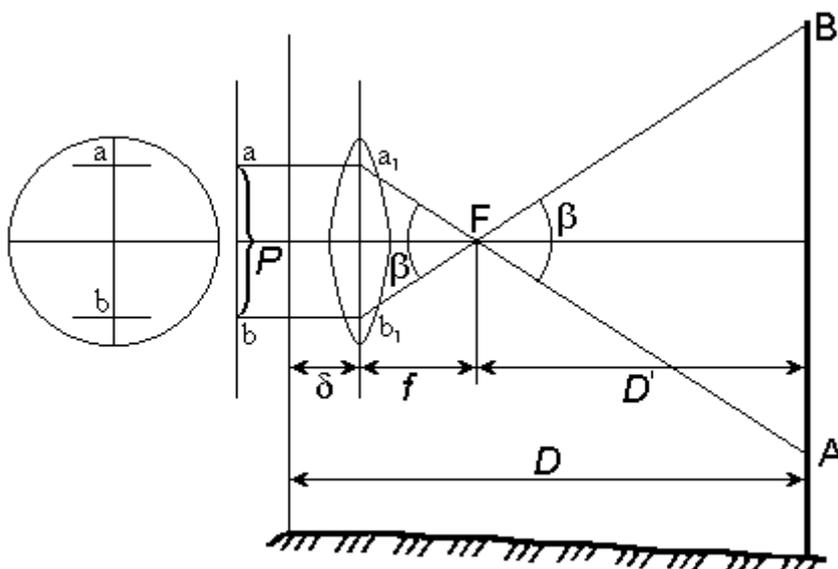


Рис. 56. Схема определения расстояний нитяным дальномером

Отношение f/P называется коэффициентом дальномера и обозначается K , а сумма $(f + \delta)$ – постоянная дальномера и обозначается C . Тогда

$$D = K \cdot n + C.$$

Дальномерные нити наносят так, чтобы при сантиметровых делениях коэффициент дальномера $K = 100$. Обычно при $f = 200$ мм P берут равным 2 мм, тогда $K = 100$.

В современных теодолитах постоянная дальномера C близка к нулю, поэтому число метров в измеряемом расстоянии равно числу метров в дальномерном отсчете

$$D = K \cdot n = 100 \cdot n.$$

При $K = 100$ и $n = 124,3$ см, $D = 100 \cdot 124,3$ см = 124,3 м.

6.3. Определение горизонтальных проложений линий измеренных дальномером

При выводе формулы $D = K \cdot n$ предполагалось, что визирная ось горизонтальна, а дальномерная рейка установлена перпендикулярно ей. В этом случае мы получим горизонтальное проложение линии $S = D = K \cdot n$.

Однако на практике в большинстве случаев визирная ось имеет некоторый угол наклона ν (рис. 57), и вследствие этого вертикально расположенная рейка не будет перпендикулярна визирной оси.

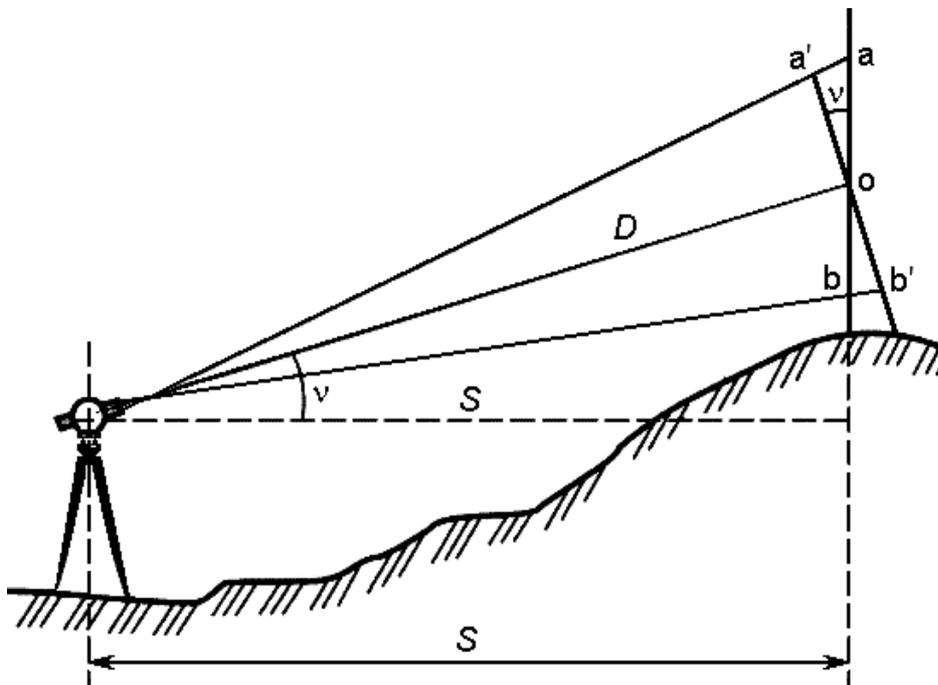


Рис. 57. Схема определения горизонтального проложения линии нитяным дальномером

Если рейку наклонить на угол ν так, чтобы она была установлена перпендикулярно визирной оси, то наклонное расстояние будет равно

$$D = K \cdot n' ,$$

где $n' = a'b' = ab \cdot \cos \nu = n \cdot \cos \nu$.

Тогда $D = K \cdot n \cdot \cos \nu$.

Отсюда получаем следующую формулу для расчета горизонтального проложения линии при её измерении нитяным дальномером

$$S = D \cdot \cos \nu = K \cdot n \cdot \cos^2 \nu .$$

На точность определения расстояний нитяным дальномером влияют следующие факторы:

- 1) толщина дальномерных нитей;
- 2) рефракция воздуха;
- 3) промежуток времени между взятием отсчетов по верхней и нижней нити.

В связи с этим точность измерения расстояний нитяным дальномером невысокая и характеризуется относительной ошибкой 1/300.

6.4. Определение коэффициента дальномера К

Коэффициент дальномера К определяют путем измерения дальномером отложенных на местности расстояний в 50, 100 и 200 м (рис. 58).

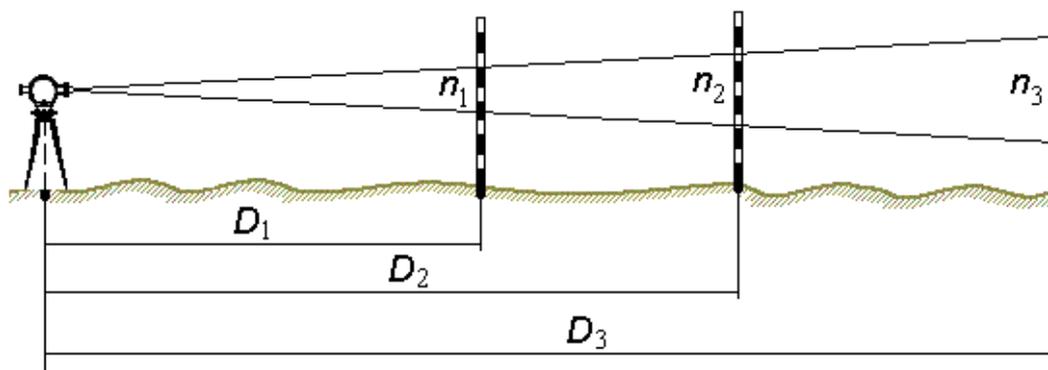


Рис. 58. Схема определения коэффициента дальномера К

По формулам $K_1 = \frac{D_1}{n_1}$, $K_2 = \frac{D_2}{n_2}$, $K_3 = \frac{D_3}{n_3}$ вычисляют три значения коэффициента дальномера и по ним рассчитывают среднее арифметическое $K_{ср}$.

6.5. Принцип измерения расстояний электромагнитными дальномерами

Развитие электроники и радиотехники позволило создать новые приборы для линейных измерений – электромагнитные дальномеры (свето- и радиодальномеры).

Принцип работы этих приборов основан на определении промежутка времени t , необходимого для прохождения электромагнитных волн (световых и радиоволн) в прямом и обратном направлении от точки А, в которой центрирован прибор, до точки В, где установлен отражатель (рис. 59).

Зная скорость распространения электромагнитных колебаний, можно записать $D = 0,5 \cdot v \cdot t$.

Из-за большой скорости света (в атмосфере $v \approx 299710$ км/час) измерение времени t необходимо выполнять с очень высокой точностью. Так, для измерения расстояния с точностью 1 см, время надо измерить с ошибкой не более 10^{-10} сек.

Измерения выполняют фазовым или импульсным методом.

В светодальномерах лазерный источник излучения периодически посылает световой импульс. Одновременно запускается счетчик временных импульсов. Счетчик останавливается, когда светодальномер получает

световой импульс, возвращенный призмным отражателем. Для повышения точности измерения выполняют многократно. Измеренное расстояние высвечивается на цифровом табло.

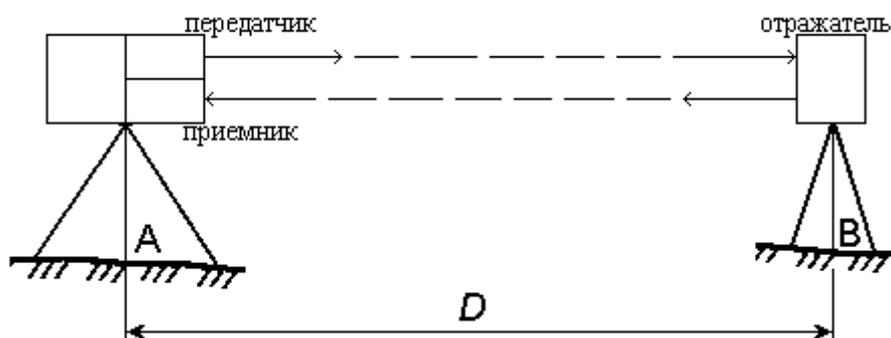


Рис. 59. Схема определения расстояния светодальномером

6.6. Способы съемки ситуации

Съемка ситуации – геодезические измерения на местности для последующего нанесения на план ситуации (контуров и предметов местности).

Выбор способа съемки зависит от характера и вида снимаемого объекта, рельефа местности и масштаба, в котором должен быть составлен план.

Съемку ситуации производят следующими способами: перпендикуляров; полярным; угловых засечек; линейных засечек; створов (рис. 60).

Способ перпендикуляров (способ прямоугольных координат) – применяется обычно при съемке вытянутых в длину контуров, расположенных вдоль и вблизи линий теодолитного хода, проложенных по границе снимаемого участка. Из характерной точки К (рис. 60, а) опускают на линию хода А – В перпендикуляр, длину которого S_2 измеряют рулеткой. Расстояние S_1 от начала линии хода до основания перпендикуляра отсчитывают по ленте.

Полярный способ (способ полярных координат) – состоит в том, что одну из станций теодолитного хода (рис. 60, б) принимают за полюс, например, станцию А, а положение точки К определяют расстоянием S от полюса до данной точки и полярным углом β между направлением на точку и линией А – В. Полярный угол измеряют теодолитом, а расстояние дальномером. Для упрощения получения углов, теодолит ориентируют по стороне хода.

При **способе засечек** (биполярных координат) положение точек местности определяют относительно пунктов съемочного обоснования путем измерения углов β_1 и β_2 (рис. 60, в) – угловая засечка, или расстояний S_1 и S_2 (рис. 60, г) – линейная засечка.

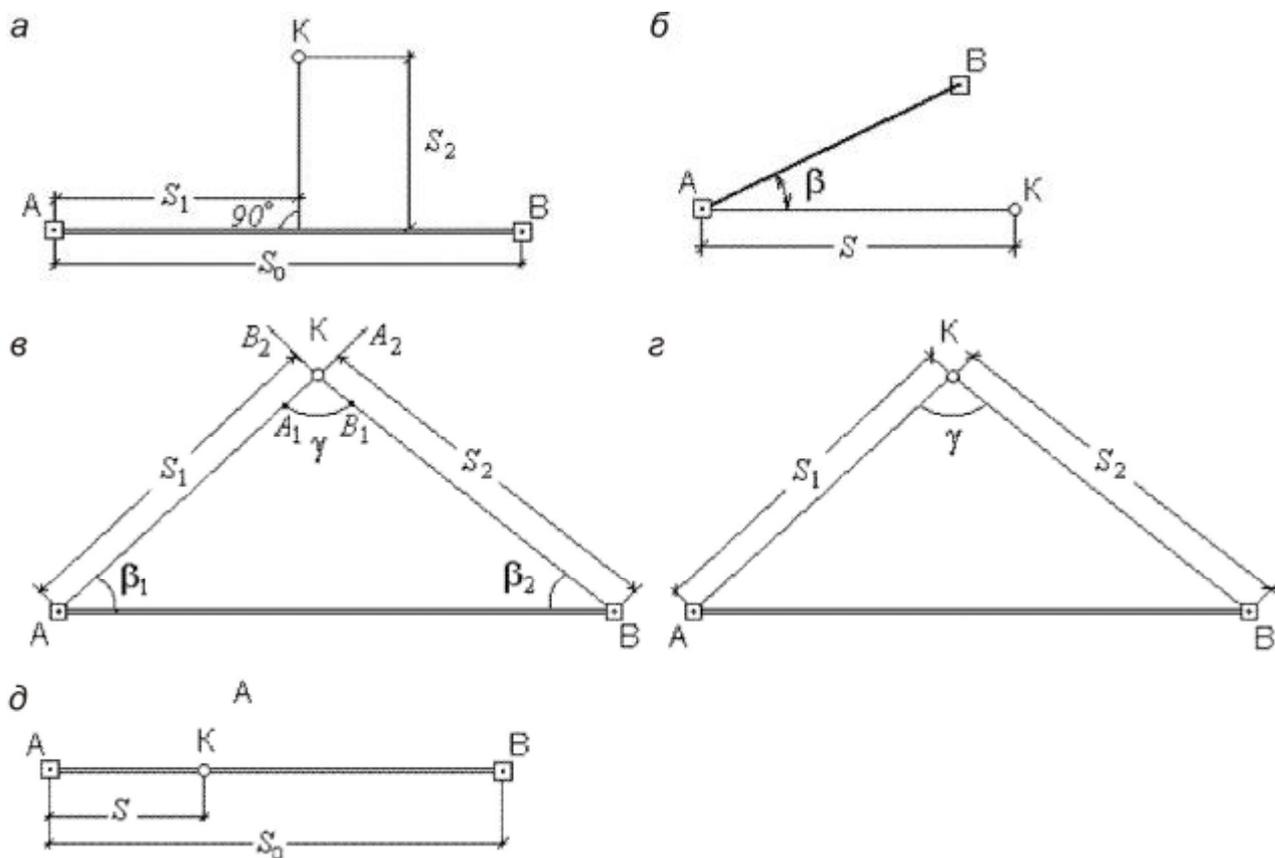


Рис. 60. Способы съемки ситуации: а – перпендикуляров; б – полярный; в – угловых засечек; г – линейных засечек; д – створов

Угловую засечку применяют для съемки удаленных или труднодоступных объектов.

Линейную засечку – для съемки объектов, расположенных вблизи пунктов съемочного обоснования. При этом необходимо чтобы угол γ , который получают между направлениями при засечке был не менее 30° и не более 150° .

Способом створов (промеров) определяют плановое положение точек лентой или рулеткой (рис. 60, д). Способ створов применяется при съемке точек, расположенных в створе опорных линий, либо в створе линий, опирающихся на стороны теодолитного хода. Способ применяется при видимости крайних точек линии.

Результат съемки контуров заносят в абрис. **Абрис** – это схематический чертеж, который составляется четко и аккуратно.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Каков принцип измерения расстояний нитяным дальномером?
2. К какому типу относится нитяной дальномер?

3. По какой формуле определяют расстояние, измеренное нитяным дальномером?
4. С какой точностью можно измерить расстояние нитяным дальномером?
5. Как определяют поправку за наклон линии, измеренной нитяным дальномером?
6. Какой физический принцип используют для измерения расстояний свето- и радиодальномерами?
7. Что называется съемкой местности?
8. Какие существуют основные способы съемки ситуации?

Лекция 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕВЫШЕНИЙ И ОТМЕТОК ТОЧЕК

План лекции

- 7.1. Задачи и виды нивелирования.*
- 7.2. Способы геометрического нивелирования.*
- 7.3. Классификация нивелиров.*
- 7.4. Нивелирные рейки.*
- 7.5. Влияние кривизны Земли и рефракция на результаты геометрического нивелирования.*

7.1. Задачи и виды нивелирования

Нивелированием называется совокупность геодезических измерений для определения превышений между точками, а также их высот.

Нивелирование производят для изучения рельефа, определения высот точек при проектировании, строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений. Результаты нивелирования имеют большое значение для решения научных задач как самой геодезии, так и для других наук о Земле.

В зависимости от применяемых приборов и измеряемых величин нивелирование делится на несколько видов.

1. **Геометрическое нивелирование** – определение превышения одной точки над другой посредством горизонтального визирного луча. Осуществляют его обычно с помощью нивелиров, но можно использовать и другие приборы, позволяющие получать горизонтальный луч.

2. **Тригонометрическое нивелирование** – определение превышений с помощью наклонного визирного луча. Превышение при этом определяют как функцию измеренного расстояния и угла наклона, для измерения ко-

торых используют соответствующие геодезические приборы (тахеометр, кипрегель).

3. *Барометрическое нивелирование* – в его основу положена зависимость между атмосферным давлением и высотой точек на местности.

4. *Гидростатическое нивелирование* – определение превышений основывается на свойстве жидкости в сообщающихся сосудах всегда находиться на одном уровне, независимо от высоты точек, на которых установлены сосуды.

5. *Аэроадионивелирование* – превышения определяются путем измерения высот полета летательного аппарата радиовысотометром.

6. *Механическое нивелирование* выполняется с помощью приборов, устанавливаемых в путеизмерительных вагонах, тележках, автомобилях, которые при движении вычерчивают профиль пройденного пути. Такие приборы называются профилографы.

7. *Стереофотограмметрическое нивелирование* – основано на определении превышения по паре фотоснимков одной и той же местности, полученных из двух точек базиса фотографирования.

8. *Определение превышений по результатам спутниковых измерений*. Использование спутниковой системы ГЛОНАСС – Глобальная навигационная спутниковая система позволяет определять пространственные координаты точек.

7.2. Способы геометрического нивелирования

Геометрическое нивелирование – это наиболее распространенный способ определения превышений. Его выполняют с помощью **нивелира**, задающего горизонтальную линию визирования.

Устройство нивелира достаточно простое. Он имеет две основные части: зрительную трубу и устройство, позволяющее привести визирный луч в горизонтальное положение.

Геометрическое нивелирование выполняется двумя способами: из середины и вперед (рис. 61).

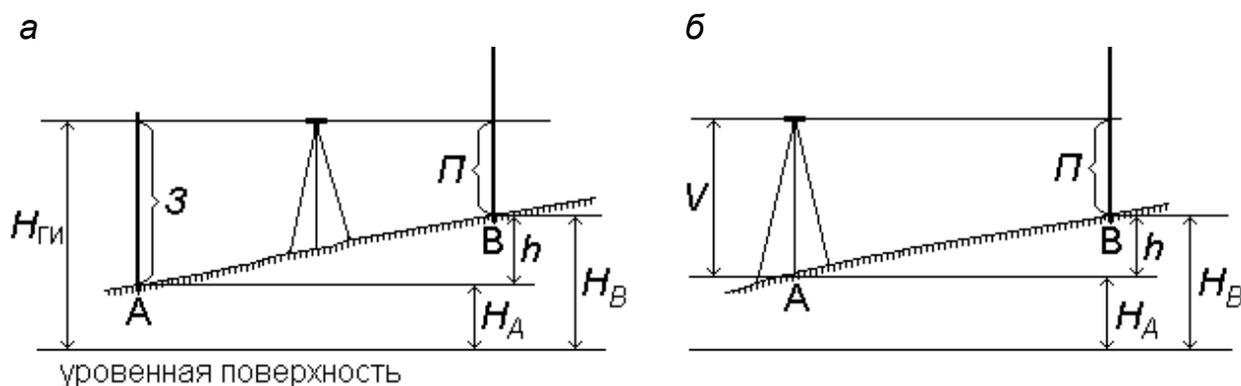


Рис. 61. Способы нивелирования: а – из середины; б – вперед

При **нивелировании из середины** нивелир располагают между двумя точками примерно на одинаковых расстояниях (рис. 61, а). В точках устанавливают отвесно рейки с сантиметровыми делениями. Их ставят на колышек, вбитый вровень с землей, или на специальный костыль, так как рейка под собственной тяжестью будет давить на землю, и отсчет по ней будет меняться. Визирный луч зрительной трубы нивелира последовательно наводят на рейки и берут отсчеты Z и P , которые записывают в миллиметрах в журнал нивелирования. Отсчет по рейке производят по средней нити нивелира, т. е. по месту, где проекция средней нити пересекает рейку. Превышение между точками определяют по формуле

$$h = Z - P$$

где Z – отсчет назад на заднюю точку А; P – отсчет вперед на переднюю точку В.

При **нивелировании вперед** прибор устанавливают над точкой А (рис. 61, б), измеряют его высоту V и берут отсчет P по рейке в точке В. Превышение определяют вычитанием из высоты прибора V отсчета P

$$h = V - P.$$

Высоту передней точки В рассчитывают по формуле

$$H_B = H_A + h.$$

Высоту визирного луча на уровневой поверхности называют горизонтом инструмента $H_{ГИ}$ (см. рис. 61) и вычисляют

$$H_{ГИ} = H_A + Z = H_A + V.$$

Место установки нивелира называется станцией. Если для определения превышения между точками А и В достаточно установить прибор один раз, то такой случай называется **простым нивелированием**.

Если же превышение между точками определяют только после нескольких установок нивелира, такое нивелирование называют **сложным** или **последовательным** (рис. 62).

В этом случае точки С и D называют **связующими**. Превышение между ними определяют как при простом нивелировании:

$$h_1 = Z_1 - P_1, \quad h_2 = Z_2 - P_2, \quad h_3 = Z_3 - P_3,$$

$$h_{AB} = h_1 + h_2 + h_3 = \sum h,$$

$$h = \sum Z - \sum P.$$

Такую схему нивелирования называют нивелирным ходом.

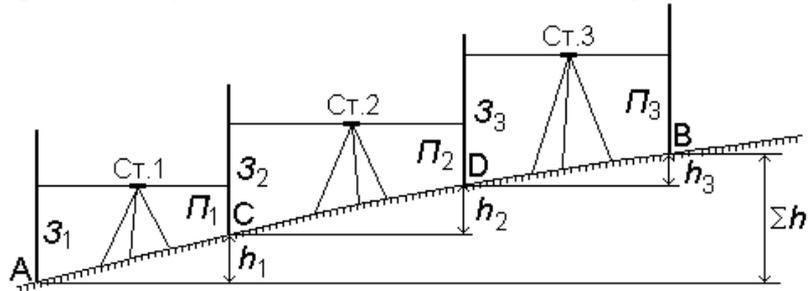


Рис. 62. Последовательное нивелирование

7.3. Классификация нивелиров

Согласно действующим ГОСТам нивелиры изготавливают трех типов: высокоточные – Н-05; точные – Н-3; технические – Н-10.

В названии нивелира числом справа от буквы Н обозначают допустимую среднюю квадратическую ошибку измерения превышения на 1 км двойного нивелирного хода.

В зависимости от того, каким способом визирный луч устанавливается в горизонтальное положение, нивелиры изготавливают в двух исполнениях:

- с цилиндрическим уровнем при зрительной трубе, с помощью которого осуществляется горизонтирование визирного луча (рис. 63);
- с компенсатором – свободно подвешенная оптико-механическая система, которая приводит визирный луч в горизонтальное положение. В названии нивелира буква К обозначает компенсатор (Н-3К, Н-3КЛ), где Л – лимб (рис. 64).



Рис. 63. Точный нивелир Н-3 с цилиндрическим уровнем при зрительной трубе: 1 – подъемные винты; 2 – круглый уровень; 3 – элевационный винт; 4 – окуляр зрительной трубы с диоптрийным кольцом; 5 – визир; 6 – кремальера; 7 – объектив зрительной трубы; 8 – закрепительный винт; 9 –

наводящий винт; 10 – контактный цилиндрический уровень; 11 – юстировочные винты цилиндрического уровня



Рис. 64. Точный нивелир 3Н-3КЛ с компенсатором и лимбом:
1 – лимб; 2 – наводящий винт; 3 – кремальера; 4 – визир

На рис. 65 приведен технический нивелир второго поколения с компенсатором и лимбом 2Н-10КЛ



Рис. 65. Технический нивелир 2Н-10КЛ

7.4. Нивелирные рейки

Нивелирные рейки для нивелирования III–IV класса и технического изготавливают из деревянных брусков двутаврового сечения шириной 8–10 см и толщиной 2–3 см.

Рейка РН-3 (рис. 66) имеет длину 3 м. Деления нанесены через 1 см. Нижняя часть рейки заключена в металлическую оковку и называется пяткой.

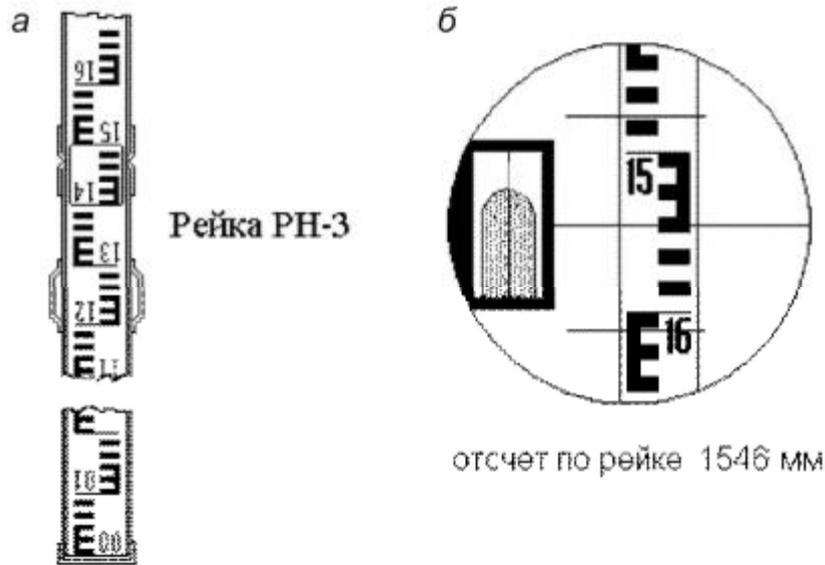


Рис. 66. Нивелирная рейка (а) и поле зрения зрительной трубы нивелира с цилиндрическим уровнем (б)

Основная шкала имеет деления черного и белого цвета, ноль совмещен с пяткой рейки. Дополнительная шкала на другой стороне рейки имеет чередующиеся красные и белые деления. С пяткой рейки совмещен отсчет больше 4000 мм. Часто встречаются комплекты реек, у которых с пятками красных сторон совпадают отсчеты 4687 и 4787 мм. Поэтому превышения, измеренные по красным сторонам данных реек, будут больше или меньше на 100 мм измеренных по черным сторонам реек.

7.5. Влияние кривизны Земли и рефракции на результаты нивелирования

При выводе формул для способов нивелирования из середины и вперед принято, что уровенная поверхность является плоскостью, визирный луч прямолинеен и горизонтален, рейки, установленные в точках, параллельны между собой.

На самом деле уровенная поверхность не является плоскостью и рейки, установленные в точках А и В перпендикулярно поверхности, не параллельны между собой (рис. 67), следовательно отсчеты $З$ и $П$ преувеличены на величину поправок за кривизну Земли: $СМ = K_1$ и $DN = K_2$.

Поправки за кривизну Земли:

$$K_1 = \frac{S_1^2}{2R} \quad \text{и} \quad K_2 = \frac{S_2^2}{2R},$$

где S_1, S_2 – расстояние от нивелира до реек; R – радиус Земли.

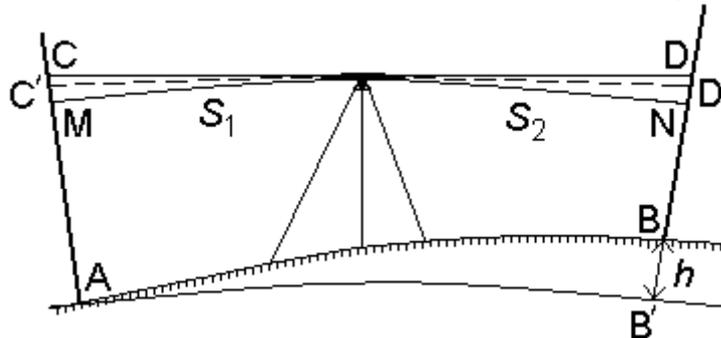


Рис. 67. Влияние кривизны Земли и рефракции на результаты геометрического нивелирования

Кроме того, известно, что луч света распространяется прямолинейно лишь в однородной среде. В реальной атмосфере, плотность которой увеличивается по мере приближения к поверхности Земли, луч света идет по некоторой кривой, которая называется рефракционной кривой. Вследствие этого визирный луч имеет форму рефракционной кривой радиуса R_1 и пересекает рейки в точках C' и D' . Поэтому отчеты по рейкам уменьшаются на величину поправок за рефракцию: $CC' = r_1$ и $DD' = r_2$, которые определяются по формуле

$$r = \frac{S^2}{2R_1}.$$

Радиус рефракционной кривой в основном зависит от температуры, плотности и влажности воздуха. Отношение радиуса Земли R к радиусу рефракционной кривой называют коэффициентом земной рефракции, среднее значение которого принимают

$$x = R/R_1 \approx 0.14.$$

Так как $R_1 = \frac{R}{x}$, то $r = 0.14 \frac{S^2}{2R}$.

Обозначим $CM - CC' = K_1 - r_1 = f_1$ и $DN - DD' = K_2 - r_2 = f_2$, где f_1 и f_2 – поправки за кривизну Земли и рефракцию

$$f_1 = \frac{S_1^2}{2R} - 0.14 \frac{S_1^2}{2R} = 0.43 \frac{S_1^2}{R},$$

$$f_2 = \frac{S_2^2}{2R} - 0.14 \frac{S_2^2}{2R} = 0.43 \frac{S_2^2}{R}.$$

Следовательно, превышение между точками А и В с учётом поправок за кривизну Земли и рефракцию

$$h = (З - f_1) - (П - f_2) = З - f_1 - П + f_2 = З - П + (f_2 - f_1),$$

$$h = З - П + 0.43 \frac{S_2^2 - S_1^2}{R}.$$

Необходимость учета поправок зависит от требуемой точности измерений. Из формулы следует, что при равенстве расстояний от нивелира до реек и примерно одинаковых условиях можно считать, что $f_1 = f_2$ и $h = З - П$. Таким образом, при нивелировании из середины с соблюдением равенства плеч влияние кривизны Земли и рефракции практически устраняется.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называется нивелированием?
2. Какие существуют виды нивелирования?
3. Какие бывают способы геометрического нивелирования?
4. В чем заключается способ нивелирования из середины и вперед?
5. В чем сущность последовательного нивелирования?
6. В чем сущность тригонометрического, барометрического и гидро-статического нивелирования?
7. Как нивелиры классифицируются по точности?
8. Чем отличается уровненный нивелир от нивелира с компенсатором?
9. Когда можно не учитывать поправки за кривизну Земли и рефракцию при геометрическом нивелировании?

Лекция 8 **ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ**

План лекции

- 8.1. Принцип организации съёмочных работ.
- 8.2. Назначение и виды государственных геодезических сетей.
- 8.3. Плановые государственные геодезические сети. Методы их создания.
- 8.4. Высотные государственные геодезические сети.
- 8.5. Геодезические съёмочные сети.
- 8.6. Плановая привязка вершин теодолитного хода к пунктам ГГС.

8.1. Принцип организации съемочных работ

Геодезические измерения сводятся к определению взаимного положения точек на земной поверхности. Чтобы ослабить влияние ошибок измерений и не допустить их накопления при геодезической съемке участков местности, принято за правило вести работу **от общего к частному**. Для этого из множества определяемых точек участка земной поверхности выделяют наиболее характерные и определяют в первую очередь их положение. Такие точки называют **опорными**. Эти точки образуют геодезическую опорную сеть (геодезическое основание), т. е. составляют как бы общую канву, на которой с необходимой, хотя и более низкой точностью, производится дальнейшая съемка.

Для того, чтобы результаты съемок были надежны, все важнейшие геодезические действия должны выполняться с контролем. Поэтому в основе качества геодезических работ лежит принцип ни одного шага вперед без контроля предыдущих действий.

8.2. Назначение и виды государственных геодезических сетей

С 1919 года в нашей стране было положено начало научно-обоснованной организации всех топографо-геодезических работ. Исполнительные, контрольные, разрешительные и надзорные функции при их производстве были объединены в Высшем геодезическом управлении (ВГУ). Впоследствии оно было преобразовано в Главное управление геодезии и картографии. С 1 марта 2009 года эти функции переданы Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии.

Одной из важнейших задач данного государственного органа является создание государственной геодезической сети (ГГС) на территории нашей страны.

Государственной геодезической сетью является совокупность опорных геодезических пунктов, прочно закрепленных на местности, взаимное расположение которых точно определено в единой государственной системе координат и высот.

Геодезические сети подразделяются на государственную геодезическую сеть, геодезическую сеть сгущения и съемочную геодезическую сеть.

Государственная геодезическая сеть является исходной для других геодезических сетей. Она делится на плановую и высотную.

Плановая государственная геодезическая сеть создается астрономическим или геодезическим методами.

При *астрономическом методе* плановое положение каждого из отдельных пунктов сети определяется независимо друг от друга из астрономических наблюдений.

Геодезический метод состоит в том, что для определения координат точек находят из астрономических наблюдений координаты только нескольких точек, называемых *исходными*. Дальнейшее определение планового положения точек производят путем геодезических измерений на местности.

Высотная государственная геодезическая сеть создается методом геометрического нивелирования.

8.3. Плановые государственные геодезические сети. Методы их создания

Основными методами создания государственной геодезической сети являются триангуляция, трилатерация, полигонометрия и спутниковые координатные определения.

Триангуляция (рис. 68, а) представляет собой цепь прилегающих друг к другу треугольников, в каждом из которых измеряют высокоточными теодолитами все углы. Кроме того, измеряют длины сторон в начале и конце цепи.

В сети триангуляции известными являются базис L и координаты пунктов A и B . Для определения координат остальных пунктов сети измеряют в треугольниках горизонтальные углы.

Триангуляция делится на классы 1, 2, 3, 4. Треугольники разных классов различаются длинами сторон и точностью измерения углов и базисов.

Развитие сетей триангуляции выполняется с соблюдением основного принципа «от общего к частному», т. е. сначала строится триангуляция 1-го класса, а затем последовательно 2-го, 3-го и 4-го класса.

Пункты государственной геодезической сети закрепляются на местности центрами. Для обеспечения взаимной видимости между пунктами над центрами устанавливают геодезические знаки деревянные или металлические. Они имеют приспособление для установки прибора, платформу для наблюдателя и визирное устройство.

В зависимости от конструкции, наземные геодезические знаки подразделяются на пирамиды, простые и сложные сигналы.

В настоящее время широко используют радиотехнические средства для определения расстояний между пунктами сети с относительными ошибками 1:100 000 – 1:1 000 000. Это дает возможность строить геодезические сети методом **трилатерации**, при которой в сетях треугольни-

ков производится только измерение сторон. Величины углов вычисляют тригонометрическим способом.

Метод **полигонометрии** (рис. 68, б) состоит в том, что опорные геодезические пункты связывают между собой ходами, называемыми полигонометрическими. В них измеряют расстояния и справа лежащие углы.

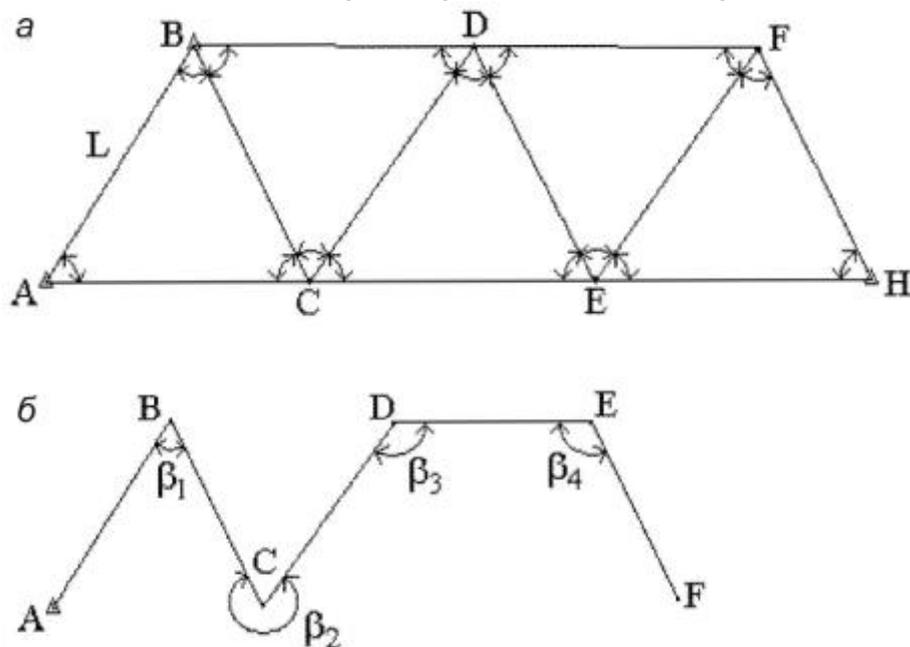


Рис. 68. Схема триангуляции (а) и полигонометрии (б)

Спутниковые методы создания геодезических сетей подразделяются на геометрические и динамические. В геометрическом методе искусственный спутник Земли используют как высокую визирную цель, в динамическом – ИСЗ является носителем координат.

8.4. Высотные государственные геодезические сети

Государственная высотная геодезическая сеть – это нивелирная сеть I, II, III и IV класса. При этом сети I и II класса являются высотной основой, с помощью которой устанавливается единая система высот на всей территории страны.

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

Вековые и фундаментальные реперы закладываются в скальные породы или в грунт. Они отличаются повышенной устойчивостью и обеспечивают сохранность высотной основы на длительное время. Вековыми реперами закрепляют места пересечений линий нивелирования I класса,

а фундаментальные – закладывают на линиях I и II класса не реже, чем через 60 км.

Временные реперы используют в качестве высотной основы при топографических съёмках, а также включают в линии нивелирования II, III и IV класса.

8.5. Геодезические съёмочные сети

Съёмочные сети являются геодезической основой при решении инженерно-геодезических задач. Их создают в качестве **съёмочного обоснования** для производства топографических съёмок, выноса на местность инженерных сооружений, а также для плановой и высотной привязки отдельных объектов.

Съёмочное обоснование разбивается от пунктов плановых и высотных опорных сетей.

Самый распространённый вид съёмочного обоснования – теодолитные ходы (рис. 69), опирающиеся на один или два исходных пункта. Они представляют собой геодезические построения в виде ломаных линий, в которых углы измеряют одним полным приёмом с помощью технического теодолита, а стороны – стальной 20-метровой лентой или дальномерами, обеспечивающими заданную точность. Теодолитные ходы могут быть замкнутыми или разомкнутыми.

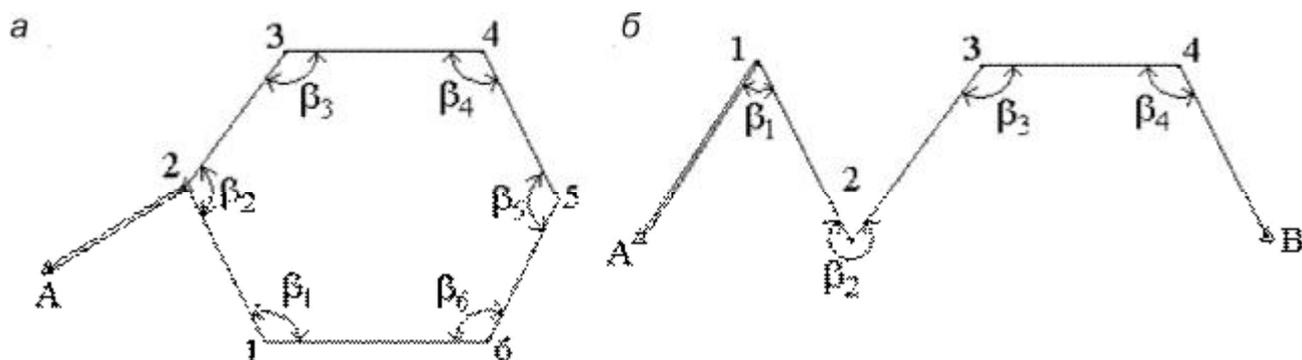


Рис. 69. Теодолитные ходы: замкнутый (а); разомкнутый (б)

Длины линий (сторон) теодолитных ходов зависят от масштаба съёмки и условий снимаемой местности, должны быть не более 350 м и не менее 20 м. Относительные линейные невязки в ходах должны быть менее 1:2000, при неблагоприятных условиях измерений допускается 1:1000.

Углы поворота на точках хода измеряют теодолитом со средней квадратической ошибкой 0.5' одним приёмом. Расхождение значений углов в полуприемах должно быть не более двойной точности теодолита.

Точки съемочного обоснования, как правило, закрепляют на местности временными знаками: деревянными кольями, столбами, металлическими штырями, трубами.

Если эти точки предполагается использовать в дальнейшем для других целей, их закрепляют постоянными знаками.

8.6. Плановая привязка вершин теодолитного хода к пунктам ГГС

Совокупность геодезических измерений и вычислений, необходимых для определения положения вершин теодолитного хода в государственной системе координат, называется *привязкой*.

Привязку можно выполнить несколькими методами.

1. Плановая привязка методом угловой засечки (рис. 70)

Дано: $A(X_A; Y_A); B(X_B; Y_B)$.

Измерены углы: $\beta_1; \beta_2; \gamma; \delta; \omega; \tau$

Контроль измерений: $\beta_1 + \beta_2 + \gamma = 180^\circ; \gamma + \delta + \omega + \tau = 360^\circ$

Найти: координаты точки 1 ($X_1; Y_1$); дирекционный угол $\alpha_{1-2} = (1-2)$.

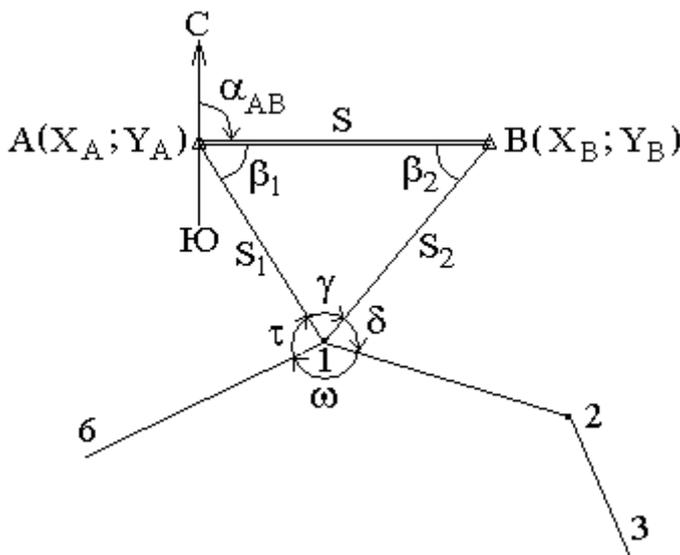


Рис. 70. Привязка теодолитного хода методом угловой засечки

1. Решение обратной геодезической задачи:

$$S_{AB} = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2};$$

$$\text{tgr}_{AB} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A} \rightarrow r_{AB} \rightarrow \alpha_{AB} \rightarrow (AB).$$

Контроль: $S_{AB} = \frac{\Delta X}{\cos r_{AB}} = \frac{\Delta Y}{\sin r_{AB}}$

2. Решение треугольника привязки:

$$S_1 = \frac{S \cdot \sin \beta_2}{\sin \gamma}; \quad S_2 = \frac{S \cdot \sin \beta_1}{\sin \gamma}.$$

3. Передача дирекционных углов:

$$(A1) = (AB) + \beta_1;$$

$$(B1) = (AB) + 180^\circ - \beta_2;$$

$$(1-2) = (A1) + 180^\circ - (\tau + \omega) = (A1) + 180^\circ (\gamma + \delta).$$

Контроль вычислений:

$$(1-2) = (B1) + 180^\circ + \delta = (B1) + 180^\circ - (\gamma + \tau + \omega).$$

4. Решение прямой геодезической задачи:

$$\Delta X_{A1} = S_1 \cos(A1); \quad \Delta X_{B1} = S_2 \cos(B1);$$

$$\Delta Y_{A1} = S_1 \sin(A1); \quad \Delta Y_{B1} = S_2 \sin(B1);$$

$$X_1 = X_A + \Delta X_{A1}; \quad X_1 = X_B + \Delta X_{B1};$$

$$Y_1 = Y_A + \Delta Y_{A1}; \quad Y_1 = Y_B + \Delta Y_{B1}.$$

Если расхождение в координатах не более 0,02 м, то находят средние значения координат X_1 и Y_1 .

2. Метод снесения координат (рис. 71)

Дано: $A(X_A; Y_A); B(X_B; Y_B)$.

Измерены: S_1 ; углы: $\gamma; \delta; \omega; \tau$.

Контроль измерений: $\gamma + \delta + \omega + \tau = 360^\circ$.

Найти: координаты точки 1 ($X_1; Y_1$); дирекционный угол (1 – 2).

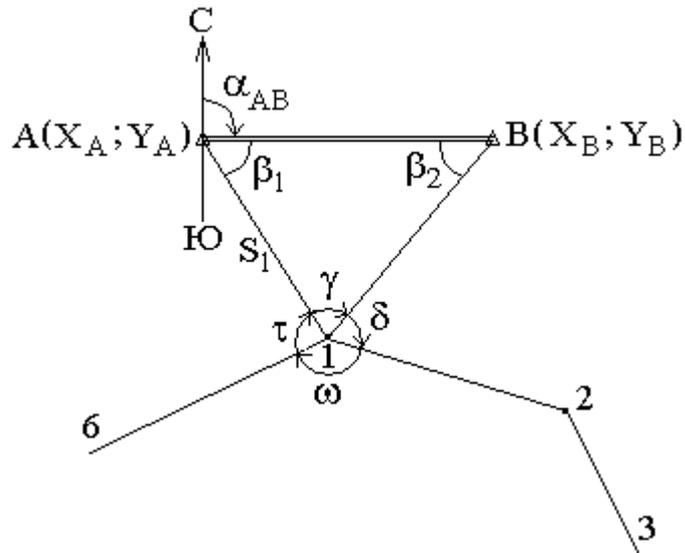


Рис. 71. Привязка методом снесения координат

1. Решение обратной геодезической задачи.
2. Решение треугольника привязки:

$$\sin \beta_2 = \frac{S_1 \cdot \sin \gamma}{S} \rightarrow \beta_2;$$

$$\beta_1 = 180^\circ - (\gamma + \beta_2);$$

$$S_2 = \frac{S \cdot \sin \beta_1}{\sin \gamma}.$$

3. Передача дирекционных углов.
4. Решение прямой геодезической задачи.

3. Метод привязки теодолитного хода к одному опорному пункту с известным направлением в нем (рис. 72).

Дано: $A(X_A; Y_A)$; α_{AB} .

Измерены: S ; углы: β ; γ ; δ ; τ .

Контроль измерений: $\gamma + \delta + \tau = 360^\circ$.

Найти: координаты точки 1 ($X_1; Y_1$); дирекционный угол (1 – 2).

1. Передача дирекционных углов:

$$(A1) = (AB) + \beta;$$

$$(1-2) = (A1) + 180^\circ + \gamma = (A1) + 180^\circ - (\tau + \delta).$$

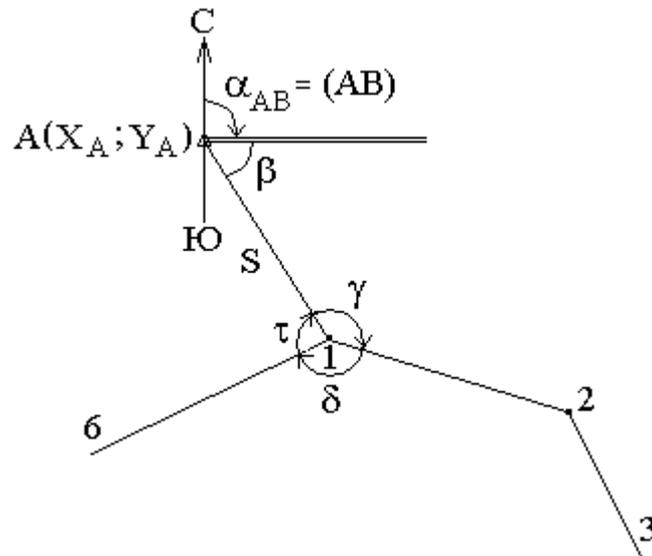


Рис. 72. Привязка к одному пункту с известным направлением

2. Решение прямой геодезической задачи:

$$\Delta X_{A1} = S \cos(A1);$$

$$\Delta Y_{A1} = S \sin(A1);$$

$$X_1 = X_A + \Delta X_{A1};$$

$$Y_1 = Y_A + \Delta Y_{A1}.$$

Для контроля привязки необходимо другую вершину теодолитного хода привязать к опорному пункту.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем состоят основные принципы построения геодезических сетей?
2. В чем сущность метода триангуляции?
3. В чем сущность метода трилатерации?
4. В чем сущность метода полигонометрии?
5. Как измеряют углы и линии при создании теодолитного хода?
6. В чем состоит задача плановой привязки теодолитного хода к опорным пунктам?
7. В чем сущность прямой и обратной геодезических задач?

Лекция 9

ТАХЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

План лекции

- 9.1. Тригонометрическое нивелирование
- 9.2. Определение превышений тригонометрическим нивелированием с учетом поправок за кривизну Земли и рефракции
- 9.3. Тахеометрическая съёмка, её назначение и приборы
- 9.4. Производство тахеометрической съёмки
- 9.5. Электронные тахеометры

9.1. Тригонометрическое нивелирование

Определить превышение между точками А и В можно с помощью наклонного визирного луча, т. е. использовать метод тригонометрического нивелирования (рис. 73).

В точке А устанавливают теодолит, в точке В – рейку. Рулеткой или рейкой измеряют высоту теодолита. Используя вертикальный круг теодолита, определяют угол наклона визирной оси трубы при её наведении на какую-либо точку рейки. Расстояние от этой точки до пятки рейки называется *высотой визирования* l . Длину линии АВ измеряют лентой или дальномером.

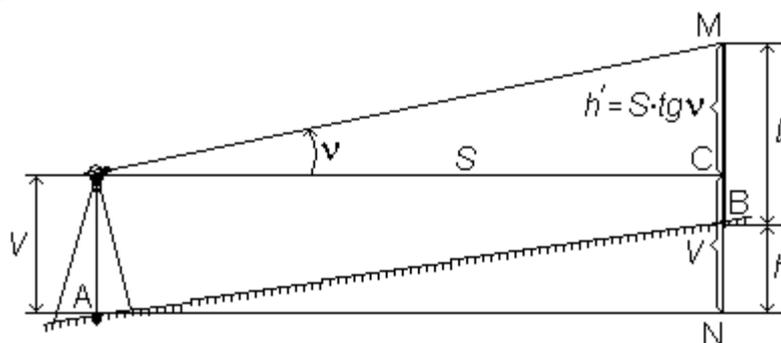


Рис. 73. Тригонометрическое нивелирование

Из рис. 73 имеем

$$h + l = h' + V,$$

$$h = h' + V - l,$$

так как

$$h' = S \cdot \operatorname{tg} v,$$

то

$$h = S \cdot \operatorname{tg} v + V - l.$$

Если расстояние измерялось лентой, то горизонтальное проложение линии АВ равно $S = D \cdot \cos v$.

9.2. Определение превышения тригонометрическим нивелированием с учетом поправки за кривизну Земли и рефракции

Говоря об определении разности высот двух точек тригонометрическим нивелированием, можно предположить, что расстояние между этими точками невелико, вследствие чего отвесные линии точек А и В можно было считать параллельными, а визирный луч – прямой линией. На самом деле при расстояниях больше 300 м приходится учитывать поправки за кривизну Земли K и рефракцию r (рис. 74)

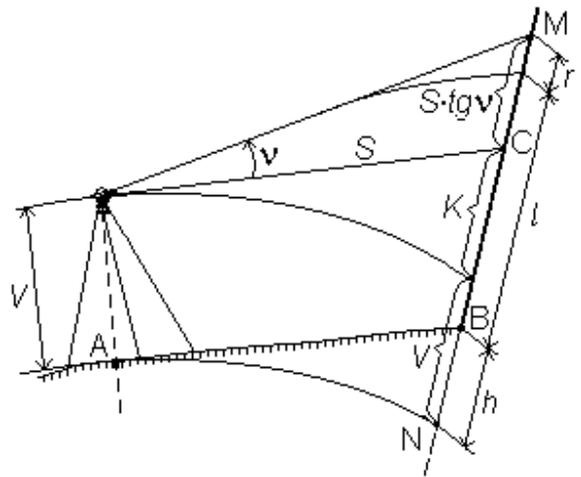


Рис. 74. Тригонометрическое нивелирование с учетом поправок на кривизну Земли и рефракции

$$S \cdot \operatorname{tg} v + V + K = h + l + r,$$

$$h = S \cdot \operatorname{tg} v + V - l + K - r,$$

$$K - r = f = 0.43 \frac{S^2}{R},$$

$$h = S \cdot \operatorname{tg} v + V - l + f.$$

Если зрительную трубу наводить на рейке на высоту теодолита, то $V = l$, превышение можно вычислить по формуле

$$h = S \cdot \operatorname{tg} v + f.$$

Тригонометрическое нивелирование становится очень производительным, когда расстояния измеряются нитяным дальномером.

В этом случае $S = D \cos^2 v$ и

$$h = D \cdot \cos^2 v \cdot \frac{\sin v}{\cos v} = \frac{2}{2} D \cdot \cos v \cdot \sin v = \frac{D}{2} \sin 2v.$$

9.3. Тахеометрическая съемка, её назначение и приборы

Тахеометрическая съемка – комбинированная съемка, в процессе которой одновременно определяют плановое и высотное положение то-

чек, что позволяет сразу получать топографический план местности. **Тахеометрия** в буквальном переводе означает скороизмерение или быстрое измерение.

Положение точек определяют относительно пунктов съемочного обоснования: плановое – полярным способом, высотное – тригонометрическим нивелированием. Длины полярных расстояний и густота пикетных (реечных) точек (максимальное расстояние между ними) регламентированы в инструкции по топографо-геодезическим работам.

При производстве тахеометрической съемки используют геодезический прибор **тахеометр**, предназначенный для измерения горизонтальных и вертикальных углов, длин линий и превышений. Теодолит, имеющий вертикальный круг, устройство для измерения расстояний и буссоль для ориентирования лимба, относятся к **теодолитам-тахеометрам**.

Теодолитами-тахеометрами является большинство теодолитов технической точности, например Т30.

Наиболее удобными для выполнения тахеометрической съемки являются тахеометры с номограммным определением превышений и горизонтальных проложений линий. В настоящее время широко используются электронные тахеометры.

9.4. Производство тахеометрической съемки

Тахеометрическая съемка выполняется с пунктов съемочного обоснования, их называют **станциями**. Чаще всего в качестве съемочного обоснования используют теодолитно-высотные ходы.

Характерные точки ситуации и рельефа называют **реечными точками** или **пикетами**. Реечные точки на местности не закрепляют.

Для определения планового положения точек съемочной сети измеряют горизонтальные углы и длины сторон. Длины измеряют землемерными лентами или стальными рулетками в прямом и обратном направлениях с точностью 1:2000.

Высоты точек определяют тригонометрическим нивелированием. Углы наклона измеряют при двух положениях вертикального круга в прямом и обратном направлениях. Расхождение в превышениях не допускается больше 4 см на каждые 100 метров расстояния.

Работу на станции при тахеометрической съемке выполняют следующим образом.

Устанавливают теодолит в рабочее положение над точкой хода (центрируют и горизонтируют прибор), измеряют высоту прибора V , отмечают её на рейке и записывают в журнал.

При круге право «П» наводят зрительную трубу на соседнюю (заднюю или переднюю) точку хода, в которой установлена рейка, и берут отсчет по вертикальному кругу. Далее переводят трубу через зенит и ориентируют лимб по стороне хода, т. е. по горизонтальному кругу устанавливают отсчет 0° , закрепляют алидаду и, вращая лимб, направляют зрительную трубу на рейку. Затем берут отсчет по вертикальному кругу при круге лево «Л» и вычисляют место нуля (МО) вертикального круга. Отсчеты и значение МО записывают в журнал.

После указанных действий приступают к съемке подробностей (характерных точек ситуации и рельефа) на станции.

На реечные точки устанавливают рейку. При круге лево «Л» и ориентированном лимбе, вращая алидаду, последовательно наводят зрительную трубу на реечные точки, делают отсчеты по дальномерным нитям, горизонтальному и вертикальному кругам и записывают их в журнале. Средний штрих сетки нитей зрительной трубы наводят на высоту прибора, отмеченную на рейке. Если высота прибора на рейке не видна из-за помех, то наводят на любой отсчет на рейке (чаще всего кратный метрам или полуметрам, например: 2, 2.5 м или 3 м). Высоту визирования / записывают в журнал.

После окончания съемки на станции зрительную трубу снова наводят на точку хода, по которой ориентировали теодолит, и берут отсчет по го-

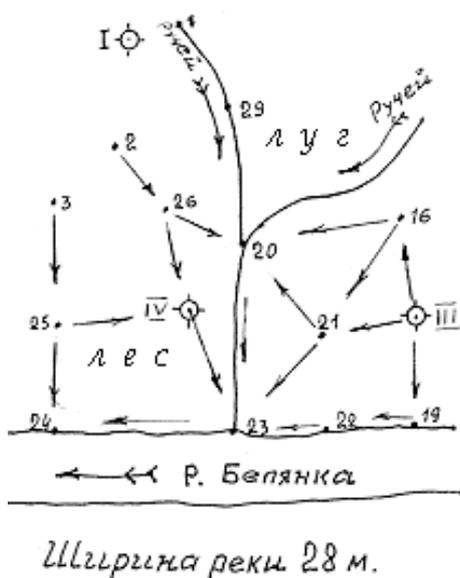


Рис. 75. Абрис тахеометрической съемки

горизонтальному кругу. Расхождение между 0° и взятым отсчетом допускается не более $\pm 5'$.

Реечные точки должны равномерно покрывать территорию съемки. Расстояния от станции до реечных точек и расстояния между реечными точками не должны превышать допусков, указанных в инструкции по тахеометрической съемке.

На каждой станции одновременно с заполнением журнала составляется **абрис** – схематический чертеж, на котором зарисованы положения реечных точек с указанием их номеров, проведены контуры местности, указан скелет рельефа и подписаны уголья (рис. 75).

Скелет рельефа изображают в виде линий, соединяющих точки, между которыми на местности ровный скат, т. е. нет перегибов. Стрелками указывают направление ската. Четко выраженные формы рельефа иногда показывают на абрисе условными горизонталями. Контуры ситуации и снимаемые объекты обозначают условными знаками или надписями.

Обработка результатов тахеометрической съемки включает в себя следующие работы:

1. Вычисление координат и отметок пунктов тахеометрических ходов.
2. Вычисление отметок реечных точек.
3. Построение плана тахеометрической съемки.

9.5. Электронные тахеометры

Электронный тахеометр объединяет теодолит, светодальномер и микроЭВМ, позволяет выполнять угловые и линейные измерения и осуществлять совместную обработку результатов этих измерений.

Тахеометры, в которых все устройства (угломерные, дальномерные, зрительная труба, клавиатура, процессор) объединены в один механизм, называются *интегрированными тахеометрами*.

Тахеометры, которые состоят из отдельно сконструированного теодолита (электронного или оптического) и светодальномера, называют *модульными тахеометрами*.

В электронных тахеометрах расстояния измеряются по разности фаз испускаемого и отраженного луча (фазовый метод), иногда (в некоторых

современных моделях) по времени прохождения луча лазера до отражателя и обратно (импульсный метод). Точность измерения зависит от технических возможностей модели тахеометра, а также от многих внешних параметров: температуры воздуха, давления, влажности и т. п. Диапазон измерения расстояний зависит также от режима работы тахеометра (отражательный или безотражательный). Дальность измерений при безотражательном режиме напрямую зависит от отражающих свойств поверхности, на которую производится измерение. Дальность измерений на светлую гладкую поверхность (штукатурка, кафельная плитка и пр.) в несколько раз превышает максимально возможное расстояние, измеренное на темную поверхность. Максимальная дальность линейных измерений: для режима с отражателем (призмой) – до пяти километров (при нескольких призмах еще дальше); для безотражательного режима – до одного километра. Модели тахеометров, которые имеют безотражательный режим могут измерять расстояния практически до любой поверхности, однако следует с осторожностью относиться к результатам измерений, проводимым сквозь ветки, листья, потому как неизвестно, от чего отразится луч, и соответственно расстояние до чего он промеряет. Существуют модели тахеометров, обладающих дальномером, совмещенным с системой фокусировки зрительной трубы. Преимущество таких приборов заключается в том, что измерение расстояний производится именно на тот объект, по которому в данный момент выставлена зрительная труба прибора.

Для выполнения съёмки электронный тахеометр устанавливают на станции и настраивают его в соответствии с условиями измерений. На пикетах ставят специальные вешки с отражателями, при наведении на которые автоматически определяются расстояние, горизонтальные и вертикальные углы. Если тахеометр имеет безотражательный режим, то можно производить измерения на речные точки, в которых нет возможности установить вешку с отражателем. МикроЭВМ тахеометра по результатам измерений вычисляет приращения координат и превышение h с учетом всех поправок. Все данные, полученные в ходе измерений, сохраняются в специальном запоминающем устройстве (накопителе информации). Они могут быть переданы с помощью интерфейсного кабеля на ПЭВМ, где с использованием специальной программы выполняется окончательная обработка результатов измерений для построения цифровой модели местности или топографического плана. Совместное использование электронного тахеометра с ПЭВМ позволяет полностью автоматизировать процесс построения модели местности.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили электронные тахеометры зарубежных фирм *Sokkia* (рис. 76), *Topcon*, *Nicon*, *Pentax*, *Leica*, *Trimble*. Они имеют встроенное программное обеспе-

чение для производства практически всего спектра геодезических работ: развитие геодезических сетей; съемка и вынос в натуру; решение задач координатной геометрии (прямая и обратная геодезическая задача, расчет площадей, вычисление засечек). Угловая точность у таких приборов может быть от 1" до 5" в зависимости от класса точности.



Рис. 76. Электронный тахеометр Sokkia SET 530RK3

К новейшим электронным тахеометрам относятся **роботизированные тахеометры, оснащенные сервоприводом**. Эти приборы могут самостоятельно наводиться на специальный активный отражатель и производить измерения. В дополнение прибор с сервоприводом может оснащаться специальной системой управления по радио, при этом съемку может производить только один человек, находясь непосредственно на измеряемой точке. Подобная схема съемки увеличивает производительность проведения съемочных работ примерно на 80 %. Если прибор с сервоприводом имеет безотражательный дальномер, то получаем систему для съемок при проведении туннельных работ, съемки фасадов зданий, съемки карьеров, съемки поверхности дорог и других площадных объектов для построения ЦММ с высокой степенью точности. Также роботизированные системы могут быть использованы для слежения за деформациями объектов, съемки движущихся объектов и т. д.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем сущность тригонометрического нивелирования?

2. Каковы особенности создания теодолитно-высотного хода в качестве обоснования для съемки?
3. Какие приборы используют при тахеометрической съемке?
4. В чём заключается работа на станции при тахеометрической съемке?
5. В чем особенность автоматизированной тахеометрической съемки?

Лекция 10

ТЕОРИЯ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

План лекции

- 10.1. Общие понятия об измерениях.
- 10.2. Ошибки измерений.
- 10.3. Свойства случайных ошибок измерений.
- 10.4. Оценка точности результатов измерений.
- 10.5. Средняя квадратическая ошибка функции общего вида.
- 10.6. Математическая обработка результатов равноточных измерений.
- 10.7. Неравноточные измерения. Понятие о весе измерения. Форма общей арифметической середины или весового среднего.

10.1. Общие понятия об измерениях

Сравнение какой-либо величины с другой однородной величиной, принятой за единицу, называют **измерением**, а полученное при этом числовое значение – **результатом измерения**.

Различают измерения прямые (непосредственные) и косвенные. Основное уравнение *прямого измерения*

$$\lambda = N \cdot K,$$

где λ – результат измерения; K – значение величины, принятой за единицу измерения (сравнение); N – отвлеченное число, показывающее во сколько раз λ больше N .

Косвенные измерения – такие измерения, которые получают по формулам, связывающим значения измеренных физических величин со значениями других физических величин, полученных из прямых измерений и являющихся аргументами этих формул.

Уравнение косвенного измерения

$$\lambda = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n).$$

10.2. Ошибки измерений

Процесс измерений протекает во времени и определенных условиях, в нём участвуют объект измерения, измерительный прибор, наблюдатель и среда, в которой выполняют измерения. В связи с этим на результаты измерений влияют качество измерительных приборов, квалификация наблюдателя, состояние измеряемого объекта и изменения среды во времени. При многократном измерении одной и той же величины из-за влияния перечисленных факторов результаты измерений могут отличаться друг от друга и не совпадать со значением измеряемой величины. Разность между результатом измерения и действительным значением измеряемой величины называется **ошибкой результата измерения**.

По характеру и свойствам ошибки подразделяют на грубые, систематические и случайные.

Грубые ошибки или *просчеты* легко обнаружить при повторных измерениях или при внимательном отношении к измерениям.

Систематические ошибки – те, которые действуют по определенным законам и сохраняют один и тот же знак. Систематические ошибки можно учесть в результатах измерений, если найти функциональную зависимость и с её помощью исключить ошибку или уменьшить её до малой величины.

Случайные ошибки – результат действия нескольких причин. Величина случайной ошибки зависит от того, кто измеряет, каким методом и в каких условиях. Случайными эти ошибки называются потому, что каждый из факторов действует случайно. Их нельзя устранить, но уменьшить влияние можно увеличением числа измерений.

10.3. Свойства случайных ошибок измерений

Теория ошибок изучает только случайные ошибки. Под случайной ошибкой здесь и далее будем понимать разность:

$$\Delta_i = X - \ell_i,$$

где Δ_i – истинная случайная ошибка; X – истинная величина; ℓ_i – измеренная величина.

Случайные ошибки имеют следующие свойства:

1. Чем меньше по абсолютной величине случайная ошибка, тем она чаще встречается при измерениях.
2. Одинаковые по абсолютной величине случайные ошибки одинаково часто встречаются при измерениях.

3. При данных условиях измерений величина случайной ошибки по абсолютной величине не превосходит некоторого предела.

Под данными условиями подразумевается один и тот же прибор, один и тот же наблюдатель, одни и те же параметры внешней среды. Такие измерения называют **равноточными**.

4. Среднее арифметическое из случайных ошибок стремится к нулю при неограниченном возрастании числа измерений.

Три первых свойства случайных ошибок достаточно очевидны. Четвертое свойство вытекает из второго.

Если $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ – случайные ошибки отдельных измерений, где n – число измерений, то четвертое свойство случайных ошибок математически выражается так:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n}{n} = 0.$$

Предел этого отношения будет равен нулю, потому что в числителе сумма случайных ошибок будет конечной величиной, так как положительные и отрицательные случайные ошибки при сложении будут компенсироваться.

Чтобы запись была компактной, Гаусс предложил сумму записывать символом $[\Delta]$, т. е. $\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n = [\Delta]$, тогда

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{[\Delta]}{n} = 0.$$

10.4. Оценка точности результатов измерений

Под точностью измерений понимается степень близости результата измерения к истинному значению измеряемой величины. Точность результата измерений зависит от условий измерений.

Для равноточных результатов измерений мерой точности является средняя квадратическая ошибка m , определяемая по формуле Гаусса:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{n}} = \pm \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}.$$

Средняя квадратическая ошибка обладает устойчивостью при небольшом числе измерений.

Вследствие третьего свойства случайные ошибки, превышающие по абсолютной величине значение $2m$, встречаются редко (5 на 100 измере-

ний). Еще реже бывают погрешности $>3m$ (3 из 1000 измерений). Поэтому утроенную погрешность называют **предельной ошибкой**

$$\Delta_{\text{пред}} \leq 3m.$$

Для особо точных измерений в качестве предельной ошибки принимают

$$\Delta_{\text{пред}} \leq 2m.$$

Все вышеперечисленные ошибки называют **абсолютными**. В геодезии в качестве специальных характеристик точности измерений используется **относительная ошибка** – отношение абсолютной ошибки к среднему значению измеряемой величины, которое выражается в виде простой дроби с единицей в числителе, например

$$f_{\text{отн}} = \frac{m_s}{S} = \frac{1}{1500}.$$

10.5. Средняя квадратическая ошибка функции общего вида

В большинстве случаев геодезические измерения выполняют с целью определения значения других величин, связанных с измеряемой функциональной зависимостью. Например: $D = K \cdot n$; $h = 3 - \Pi$; $h = S \cdot \text{tg} \nu$.

Для суждения о получаемой при этом точности необходимо определить среднюю квадратическую ошибку функции по средним квадратическим ошибкам исходных величин, которые в свою очередь, могут являться результатами измерений или функциями результатов измерений.

Пусть $u = f(x, y, z)$ есть некоторая функция независимых величин x, y, z , измеренных (вычисленных) со средними квадратическими ошибками m_x, m_y, m_z .

Продифференцируем функцию по всем переменным и получим

$$du = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz.$$

В этой формуле бесконечно малые приращения – дифференциалы – заменим истинными ошибками. Получим выражение

$$\Delta u = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial u}{\partial z} \Delta z,$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – истинные ошибки.

Перейдем от истинных ошибок к средним квадратическим ошибкам. Для этого положим, что x, y, z измерено n раз, где можно считать $n \rightarrow \infty$. Соответственно числу измерений составляем n равенств

$$\begin{aligned} \Delta u_1 &= \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_1 + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_1 + \frac{\partial u}{\partial z} \Delta z_1, \\ \Delta u_2 &= \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_2 + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_2 + \frac{\partial u}{\partial z} \Delta z_2, \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta u_n &= \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_n + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_n + \frac{\partial u}{\partial z} \Delta z_n. \end{aligned}$$

Возведем каждое из равенств в квадрат, сложим и разделим на n

$$\begin{aligned} \frac{[\Delta u^2]}{n} &= \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \frac{[\Delta x^2]}{n} + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \frac{[\Delta y^2]}{n} + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \frac{[\Delta z^2]}{n} + \\ &+ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \frac{[\Delta x \Delta y]}{n} + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \frac{[\Delta x \Delta z]}{n} + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \frac{[\Delta y \Delta z]}{n}. \end{aligned}$$

Так как $\frac{[\Delta u^2]}{n} = m_u^2; \frac{[\Delta x^2]}{n} = m_x^2; \frac{[\Delta y^2]}{n} = m_y^2; \frac{[\Delta z^2]}{n} = m_z^2,$

то
$$m_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 m_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 m_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 m_z^2,$$

где $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}$ представляют собой частные производные данной функции, вычисленные для соответствующих значений аргументов.

10.6. Математическая обработка результатов равноточных измерений

Среднее арифметическое (арифметическая середина). Если имеется ряд результатов равноточных измерений l_1, l_2, \dots, l_n одной и той же

величины X , то нет оснований отдавать предпочтение какому-либо из этих значений. В этом случае за окончательное значение X принимают величину, вычисленную как **среднее арифметическое** из всех результатов

$$L = \frac{\mathbf{l}_1 + \mathbf{l}_2 + \dots + \mathbf{l}_n}{n} = \frac{[\mathbf{l}]}{n}.$$

Случайные ошибки получают как

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \mathbf{l}_1 - x, \\ \Delta_2 &= \mathbf{l}_2 - x, \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_n &= \mathbf{l}_n - x. \end{aligned}$$

Сложив левые и правые части этих равенств, получим

$$[\Delta] = [\mathbf{l}] - nx.$$

Отсюда
$$x = \frac{[\mathbf{l}]}{n} - \frac{[\Delta]}{n}.$$

На основании четвертого свойства при $n \rightarrow \infty \frac{[\Delta]}{n} = 0$, тогда $x = \frac{[\mathbf{l}]}{n} = L$.

Следовательно, при большом числе измерений среднее арифметическое равно истинному значению X . Это и позволяет использовать среднее арифметическое в качестве окончательного результата выполненных измерений. Иначе его называют **вероятнейшим значением измеренной величины**.

Контроль вычисления среднего арифметического осуществляется по вероятнейшим ошибкам δ

$$\begin{aligned} \delta_1 &= L - \mathbf{l}_1, \\ \delta_2 &= L - \mathbf{l}_2, \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_n &= L - \mathbf{l}_n. \end{aligned}$$

Сложив уравнения $[\delta] = n \cdot L - [\mathbf{l}]$, получим $[\delta] = 0$.

Это свойство вероятнейших ошибок позволяет контролировать правильность вычисления арифметической середины.

Средняя квадратическая ошибка среднего арифметического. Для вычисления средней квадратической ошибки M арифметической середины пользуются формулой

$$M = \frac{m}{\sqrt{n}},$$

из которой следует, что средняя квадратическая ошибка арифметической середины в \sqrt{n} раз меньше средней квадратической ошибки отдельного измерения.

Средние квадратические ошибки, выраженные через вероятнейшие ошибки. Используя уклонения (вероятнейшие ошибки), вычисляем среднюю квадратическую ошибку уклонения m одного измерения по формуле Бесселя

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\delta^2]}{n-1}}.$$

Среднее квадратическое уклонение M арифметической середины в этом случае вычисляем по формуле

$$M = \pm \sqrt{\frac{[\delta^2]}{n(n-1)}}.$$

10.7. Неравноточные измерения.

Понятие о весе измерения.

Формула общей арифметической середины или весового среднего

Если измерения выполнялись не в одинаковых условиях, то результаты нельзя считать одинаково надежными. Такие измерения называют **неравноточными**. Например, один и тот же угол можно измерить точным и техническим теодолитом. Результаты данных измерений будут неравноточными.

Мерой сравнения результатов при неравноточных измерениях, т. е. мерой относительной ценности полученных неравноточных результатов является **вес результата измерения**.

Вес выражает как бы степень доверия, оказываемого данному результату по сравнению с другими результатами.

Чем надежнее результат, тем больше его вес. Вес определяется как величина, обратная квадрату средней квадратической ошибки

$$p = \frac{1}{m^2}.$$

Если, например, имеется два неравноточных значения длины линии 220.35 ± 0.1 м и 220.35 ± 0.2 м, то в качестве весов p_1 и p_2 могут быть приняты числа:

$$p_1 = \frac{1}{(0.1)^2} = \frac{1}{0.01} = 100,$$

$$p_2 = \frac{1}{(0.2)^2} = \frac{1}{0.04} = 25.$$

Веса можно умножать или делить, но на одно и то же число. Разделив вычисленные в примере веса на 25, получим $p_1 = 4$ и $p_2 = 1$.

Так как $p_1 > p_2$, то первое измерение более точное.

Допустим имеется ряд равноточных результатов измерений l_1, l_2, \dots, l_n , для которых рассчитаны средняя квадратическая ошибка m , среднее арифметическое ряда измерений $L = \frac{\sum l}{n}$ и средняя квадратическая ошибка M . На основании определения веса, весом p отдельного измерения и весом арифметической середины P будут

$$p = \frac{1}{m^2},$$

$$P = \frac{1}{M^2} = \frac{1}{\left(\frac{m}{\sqrt{n}}\right)^2} = \frac{n}{m^2}.$$

Умножив веса на m^2 , получим $p=1$ и $P=n$, следовательно, вес арифметической середины больше веса отдельного измерения в n раз, n – число измерений, из которых вычислена данная арифметическая середина.

Иначе, весом результата измерения называется число равноточных измерений, из которых получен данный неравноточный результат измерения как среднее арифметическое.

Рассмотрим вывод **формулы общей арифметической середины или весового среднего**.

Пусть величина имеет ряд равноточных измерений:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{l}'_1 \mathbf{l}'_2 \dots \mathbf{l}'_{p_1}, \quad L' &= \frac{\mathbf{l}'_1 + \mathbf{l}'_2 + \dots + \mathbf{l}'_{p_1}}{p_1} \\ \mathbf{l}''_1 \mathbf{l}''_2 \dots \mathbf{l}''_{p_2}, \quad L'' &= \frac{\mathbf{l}''_1 + \mathbf{l}''_2 + \dots + \mathbf{l}''_{p_2}}{p_2} \\ \mathbf{l}^{(k)}_1 \mathbf{l}^{(k)}_2 \dots \mathbf{l}^{(k)}_k, \quad L^{(k)} &= \frac{\mathbf{l}^{(k)}_1 + \mathbf{l}^{(k)}_2 + \dots + \mathbf{l}^{(k)}_k}{p_k} \end{aligned} \right\} p_1, p_2, \dots, p_k,$$

где p_1, p_2, \dots, p_k – не одинаковое число измерений. Так как измерения равноточные, то для получения вероятнейшего значения, необходимо образовать из всех результатов измерений среднее арифметическое

$$\mathbf{l}_p = \frac{\mathbf{l}'_1 + \mathbf{l}'_2 + \dots + \mathbf{l}'_{p_1} + \mathbf{l}''_1 + \mathbf{l}''_2 + \dots + \mathbf{l}''_{p_2} + \mathbf{l}^{(k)}_1 + \mathbf{l}^{(k)}_2 + \dots + \mathbf{l}^{(k)}_k}{p_1 + p_2 + \dots + p_k}.$$

Разбив теперь рассматриваемый ряд равноточных измерений на k групп, образуем средние арифметические по группам $L', L'', \dots, L^{(k)}$. Полученные арифметические средние можно рассматривать как новые результаты измерений той же величины, но уже неравноточные. Таким образом, вместо первоначального ряда равноточных измерений для некоторой величины мы получили новый ряд неравноточных измерений $L', L'', \dots, L^{(k)}$ с весами p_1, p_2, \dots, p_k . По данным неравноточным измерениям арифметическое среднее \mathbf{l}_p определяют по формуле

$$\mathbf{l}_p = \frac{L'p_1 + L''p_2 + \dots + L^{(k)}p_k}{p_1 + p_2 + \dots + p_k} = \frac{[Lp]}{[p]},$$

$$\mathbf{l}_p = \frac{[Lp]}{[p]}.$$

Полученное значение называется **общей арифметической средней** или **весовым средним**.

Общая арифметическая середина из данных неравноточных измерений равна сумме произведений каждого измерения и его веса, разделенной на сумму весов. Она является вероятнейшим значением измеряемой величины.

Аналогично тому, как при равноточных измерениях, для оценки точности отдельного результата и арифметической середины, при оценке неравноточных измерений определяют среднюю квадратическую ошибку единицы веса

$$M = \pm \sqrt{\frac{[\rho\delta^2]}{n-1}}$$

и среднюю квадратическую ошибку весового среднего

$$M_p = \pm \frac{M}{\sqrt{[\rho]}} = \pm \sqrt{\frac{[\rho\delta^2]}{[\rho](n-1)'}}$$

где δ – отклонения отдельных результатов измерений от общей арифметической середины.

Для контроля правильности вычислений используется свойство

$$[\rho\delta] = 0.$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называется измерением?
2. Что такое грубые, систематические и случайные ошибки?
3. Какие измерения называются равноточными, а какие – неравноточными?
4. Каковы основные свойства случайных ошибок измерений?
5. Как определяют вероятнейшее значение измеренной величины при равноточных и неравноточных измерениях?
6. Что называется предельной, абсолютной и относительной ошибками?
7. Как определяют среднюю квадратическую ошибку функции общего вида?
8. Что такое вес измерения?
9. Как определяют общую арифметическую середину?

Лекция 11

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ. РАЗБИВКА ТРАССЫ

План лекции

- 11.1. Понятие о трассировании линейных сооружений.
- 11.2. Укладка трассы на местности.
- 11.3. Контроль угловых измерений на трассе.
- 11.4. Разбивка пикетажа, поперечников, съемка полосы местности.
- 11.5. Пикетажный журнал.

11.1. Понятие о трассировании линейных сооружений

Линейными называются сооружения, которые имеют большую протяженность при сравнительно малой ширине. К таким сооружениям относятся железные дороги, шоссейные дороги, каналы, трубопроводы и т. д.

Ось линейного сооружения называется *трассой*. Основные элементы трассы: *план* и *продольный профиль*.

В плане трасса состоит из прямых участков, соединенных кривыми постоянного или переменного радиуса кривизны.

В продольном профиле трасса состоит из прямых участков разного уклона, соединенных вертикальными кривыми.

Основное требование, предъявляемое к дорожным трассам – это обеспечение плавности и безопасности движения с заданными скоростями. Поэтому план трассы и её профиль должны отвечать определенным требованиям, которые рекомендуются техническими условиями на проектирование, где задаются предельно допустимые (руководящие) уклоны, минимально возможные радиусы кривых и другие элементы трассы.

Вместе с тем, трасса должна проходить так, чтобы были обеспечены минимальные расходы на строительство дороги.

Комплекс работ по определению положения трассы называется **трассированием**.

Сначала выполняется *камеральное трассирование* – нанесение трассы на топографические карты, планы или материалы аэрофотосъемки. При этом необходимо обходить контурные и рельефные препятствия. В этих случаях возникают варианты проложения трассы.

В равнинной местности при уклонах местности меньше допустимых выполняют *свободное проектирование*, используя *вольный ход*, при котором укладку трассы производят по кратчайшему направлению, и её положение зависит только от естественных и искусственных препятствий.

В холмистой и горной местности крутизна скатов превышает допустимые уклоны дороги, и в таких условиях трассу прокладывают *напряженным ходом*, т. е. отыскивают такие её направления, которые имеют предельно допустимый уклон. В результате получают извилистую трассу, которую на отдельных участках спрямляют, заменяя ломаную линию на прямую. В горной местности, для обеспечения допустимого уклона, трассу прокладывают в виде серпантинных и петель.

После камерального трассирования выполняют *полевые изыскания*, в ходе которых устанавливают окончательное положение трассы. Проект трассы выносят на местность. Укладывают трассу в виде теодолитно-нивелирного или теодолитно-высотного хода.

Затем переходят к рабочему проектированию. Для каждого сооружения создают проект, а для трассы прокладывают теодолитно-нивелирный ход.

11.2. Укладка трассы на местности

В плане ось трассы укладывают в виде теодолитного хода.

Точки, которые являются вершинами углов, служат плановым обоснованием. Вершину угла закрепляют колом, который забивают вровень с землей. На расстоянии 1 метра от кола с внешней стороны угла на его биссектрисе устанавливают столб с затесом (рис. 77). На затесе, обращенном в сторону вершины угла, делают надпись, указывающую номер вершины угла, год выполнения работы, угол поворота трассы, радиус вписываемой в угол кривой, расстояние от начала трассы. От вершины угла измеряют расстояние до расположенных вблизи местных предметов (дерево, угол здания, перекресток, валун и т. д.) и показывают их на **абрисе** – схеме, составляемой для облегчения отыскания вершины угла.

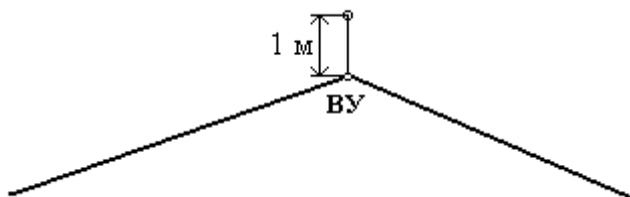


Рис. 77. Закрепление углов на трассе

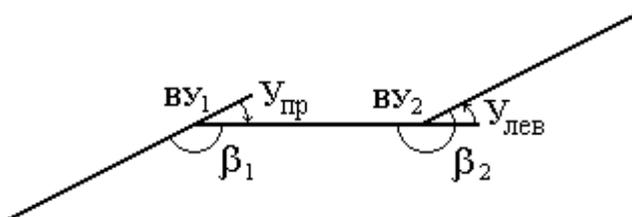


Рис. 78. Углы поворота трассы и углы справа по ходу трассы

Над колом, закрепляющим вершину угла, устанавливают теодолит и измеряют одним приемом с точностью до 0,5' лежащий справа по ходу трассы угол между направлениями на соседние вершины углов (рис. 78).

После измерения вычисляют угол поворота трассы.

Углом поворота трассы называется угол между продолженным предыдущим и последующим её направлениями. Его вычисляют по формулам:

$$У_{пр} = 180^\circ - \beta \text{ (при повороте трассы вправо } \beta < 180^\circ \text{),}$$

$$У_{лев} = \beta - 180^\circ \text{ (при повороте трассы вправо } \beta > 180^\circ \text{).}$$

Затем выполняют разбивку кривых участков трассы.

11.3. Контроль угловых измерений на трассе

Пусть дан дирекционный угол начального направления трассы α_0 . Углы поворота трассы $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, \dots, Y_n$ измерены теодолитом (рис. 79).

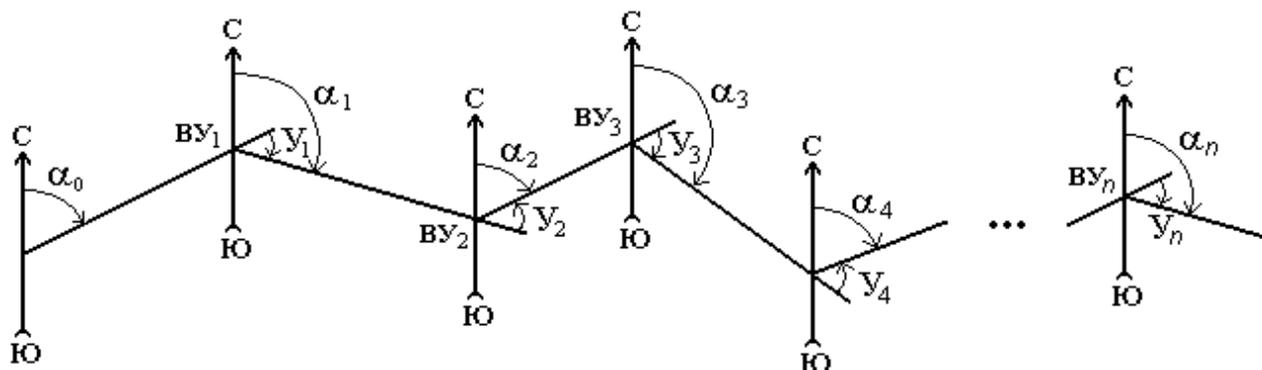


Рис. 79. Определение дирекционных углов по углам поворота трассы

Найдем дирекционные углы остальных направлений трассы непосредственно из рис. 79

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \alpha_0 + Y_1, \\ \alpha_2 &= \alpha_1 - Y_2, \\ \alpha_3 &= \alpha_2 + Y_3, \\ \alpha_4 &= \alpha_3 - Y_4, \\ &\dots \\ \alpha_n &= \alpha_{n-1} - Y_n,\end{aligned}$$

т. е. дирекционный угол последующего направления равен дирекционному углу предыдущего направления плюс правый угол поворота или минус левый угол поворота:

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + Y_{пр},$$

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} - Y_{лев},$$

складывая все равенства, получим

$$\alpha_n = \alpha_0 + \sum Y_{пр} - \sum Y_{лев}$$

или

$$\alpha_n - \alpha_0 = \sum Y_{пр} - \sum Y_{лев}.$$

Данная формула используется для контроля вычислений дирекционных углов сторон трассы.

Контроль угловых измерений на трассе выполняют, вычисляя значение практической угловой невязки хода $\Delta\beta_{пр}$ по измеренным углам поворота $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, \dots, Y_n$ и дирекционным углам α_0 начального и α_n конечного направлений трассы (рис. 79)

$$\Delta\beta_{пр} = \sum Y_{пр} - \sum Y_{лев} - (\alpha_n - \alpha_0).$$

Если $\Delta\beta_{пр}$ не превышает допустимую невязку (для теодолитных ходов – $\pm 1'\sqrt{n}$), определяют поправки, которые учитываются с обратным знаком при исправлении измеренных углов. После этого определяют дирекционные углы остальных направлений трассы.

11.4. Разбивка пикетажа, поперечников, съемка полосы местности

Расстояния на трассе измеряют дважды. Сначала вместе с угловыми измерениями с помощью светодальномеров или мерных лент определяют расстояния между вершинами углов. При углах наклона более 2° измеренные расстояния уменьшают на величину поправки за наклон.

Второй раз расстояния измеряют для разбивки **пикетажа, элементов кривых и поперечных профилей**. Данные измерения выполняют обычно мерными лентами или 50-метровыми рулетками.

В зависимости от условий местности предельная относительная погрешность линейных измерений допускается 1:1000 – 1:2000.

В ходе разбивки пикетажа одновременно выполняют съемку точек ситуации, расположенных вблизи трассы.

Пикетом принято называть конечные точки, обозначающие участки определенной длины. Для железных и автомобильных дорог пикетом считается отрезок в 100 метров. Пикет обозначают буквами «ПК» и числом, например, «ПК12» (рис. 80) указывает, что данная точка расположена на расстоянии 1200 м от начала трассы.

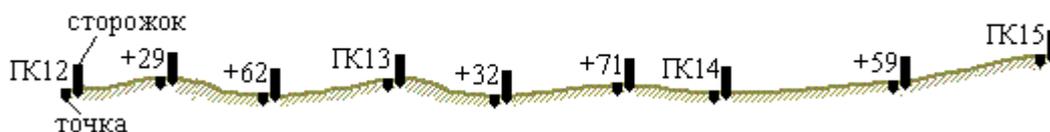


Рис. 80. Разбивка пикетажа

Пикеты закрепляют на местности, забивая вровень с землей кол. Рядом с ним (впереди него по ходу трассы, на расстоянии 20–25 см) заби-

вают второй кол – **сторожок**, возвышающийся над поверхностью земли. На сторожке подписывают порядковый номер пикета, например ПК12.

Кроме пикетов на местности отмечают ещё **плюсовые точки: рельефные** – характерные перегибы рельефа местности (с точностью до 1 м) и **контурные** – пересекаемые трассой сооружения, водотоки, границы угодий, дороги (с точностью до 1 см). Плюсозые точки также закрепляют колышком и сторожкой. На сторожке пишут номер пикета и расстояние от него в метрах. Например, ПК13+32, что означает 32 метра после ПК13 или 1332 м от начала трассы.

Там, где местность имеет заметный (более 1:5) поперечный уклон, на каждом пикете и плюсовой точке разбивают перпендикуляры к трассе, называемые **поперечниками**. Их разбивают в обе стороны от трассы длиной 15–30 м с таким расчетом, чтобы обеспечить съемку всей полосы местности. Конечные точки поперечников закрепляют точкой и сторожкой, плюсовые точки, располагаемые в местах изменения наклона местности, – только сторожками. На них пишут расстояние от оси трассы: с буквой «П», если справа от оси, «Л» – слева

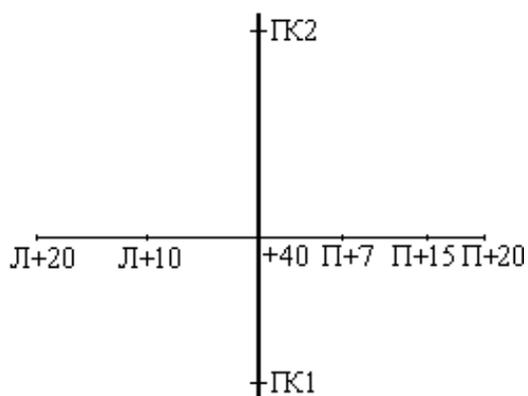


Рис. 81. Разбивка поперечника

(рис. 81). Одновременно с разбивкой пикетажа по обеим сторонам от оси трассы выполняют съемку полосы местности. Ширина полосы съемки зависит от характера будущего сооружения и устанавливается соответствующими техническими инструкциями. В полосе шириной 20 – 25 м с каждой стороны оси трассы съемку ведут инструментально, в основном методом перпендикуляров, а дальше – глазомерно.

11.5. Пикетажный журнал

При разбивке трассы ведут пикетажный журнал (рис. 82), изготовляемый из миллиметровой бумаги размером 10×15 см. Он является основным полевым документом при построении на продольном профиле трассы её плана и ситуации.

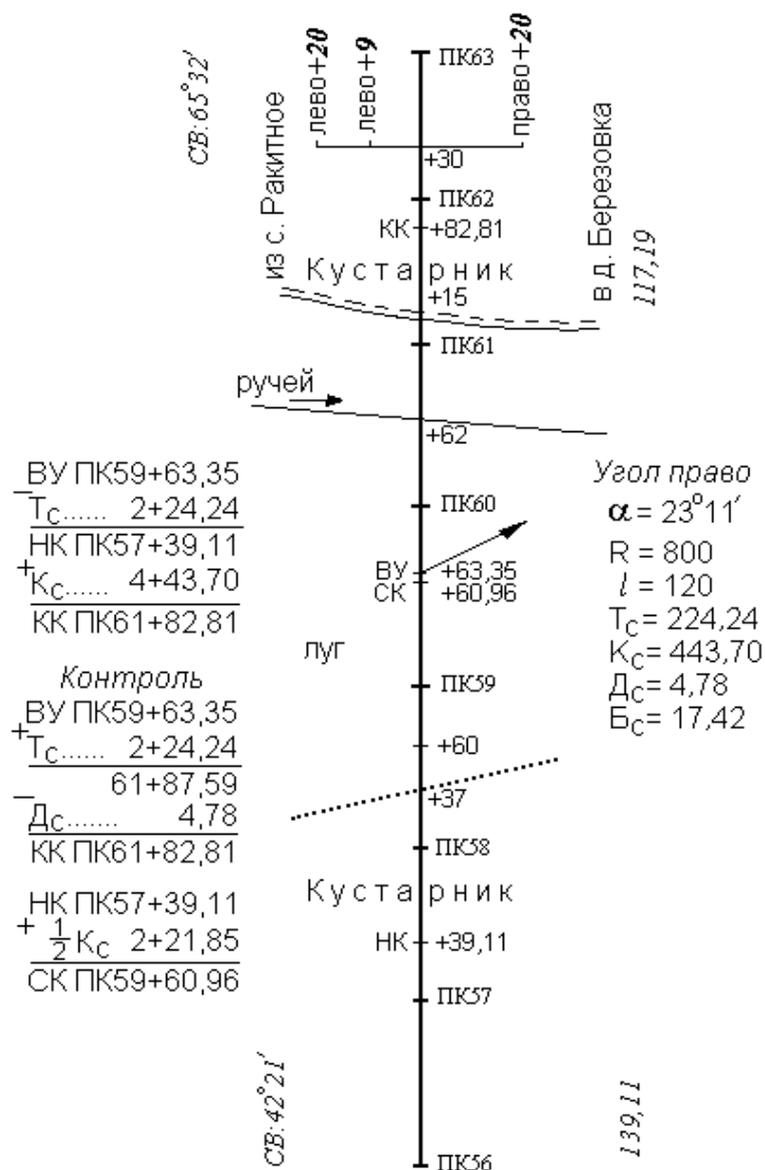


Рис. 82. Пикетажный журнал

По середине страницы пикетажного журнала проводят прямую, изображающую ось трассы, на ней в масштабе 1:2000 штрихами отмечают положение пикетов и плюсовых точек, подписывая рядом с ними их значения. Каждую новую страницу начинают с пикета, которым закончена предыдущая. В местах поворота трассы от оси стрелкой указывают направление поворота и вблизи на свободном месте в столбик записывают величину угла поворота и элементы кривой. На оси трассы отмечают главные точки кривых (начало, середину и конец), подписывают их пикетаж. Напротив прямых участков трассы выписывают их румбы и длины. Ситуацию в журнале зарисовывают схематично, указывая расстояния от оси трассы до предметов и габариты строений.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие работы включает в себя трассирование?
2. Что представляет собой план трассы?
3. Что представляет собой продольный профиль трассы?
4. Что является углом поворота трассы и как его определяют?
5. Как разбивают пикетаж, плюсовые точки и поперечники?
6. Как определяют дирекционные углы сторон трассы по углам поворота?
7. Что представляет собой пикетажный журнал и каково его содержание?

Лекция 12

ДОРОЖНЫЕ ЗАКРУГЛЕНИЯ

План лекции

- 12.1. *Круговые кривые.*
- 12.2. *Вычисление пикетажа главных точек круговой кривой.*
- 12.3. *Разбивка кривой в главных точках на местности.*
- 12.4. *Детальная разбивка круговой кривой.*
- 12.5. *Вынос пикетов на кривую.*

12.1. Круговые кривые

На всех линейных сооружениях, предназначенных для движения транспорта, в местах изменения направления трассы для сопряжения прямых участков с целью плавного и постепенного поворота движущегося транспортного средства устраивают закругления или кривые. Закругления могут быть любыми. Простейшим является дуга окружности определенного радиуса, т. е. **круговая кривая**.

На железных дорогах применяют круговые кривые со следующими радиусами: 4000, 3000, 2000, 1800, 1500, 1200, 1000, 800, 700, 600, 400 и 300 м. Конкретное решение о применении радиусов железнодорожных кривых принимают в соответствии с конкретными условиями и строительно-техническими нормами СТН Ц-01-95 [6].

Круговая кривая характеризуется четырьмя главными точками и шестью основными элементами (рис. 83).

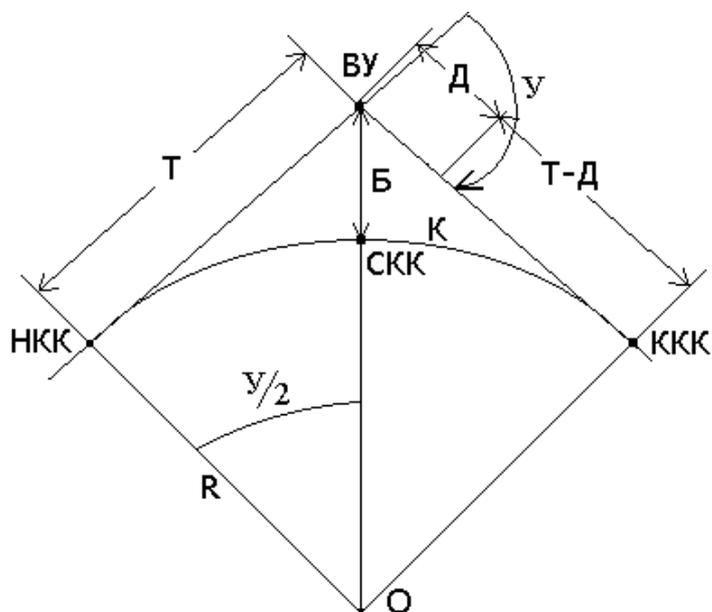


Рис. 83. Схема круговой кривой

Главными точками кривой, которые определяют положение кривой на местности, являются: вершина угла ВУ; начало круговой кривой НКК; середина круговой кривой СКК; конец круговой кривой ККК.

Основными элементами кривой являются:

1. Угол поворота трассы $У$.
2. Радиус закругления R .

Во время изысканий угол $У$ вычисляют, а радиус R назначают. Остальные элементы находят по формулам, вытекающим из прямоугольного треугольника с вершинами ВУ, НКК, О (рис. 83).

3. Тангенс кривой (касательная) T – расстояние по прямой от вершины угла до начала или конца кривой

$$T = R \cdot \operatorname{tg} \frac{У}{2}.$$

4. Длина кривой K от начала кривой до её конца

$$K = \frac{2\pi R}{360^\circ} \cdot У = \frac{\pi R}{180^\circ} \cdot У.$$

5. Биссектриса кривой B – отрезок от вершины угла до середины кривой

$$B = \frac{R}{\cos \frac{У}{2}} - R = \frac{R}{\cos \frac{У}{2}} (1 - \cos \frac{У}{2}) = R(\sec \frac{У}{2} - 1).$$

6. Домер D – разность между длиной двух тангенсов и кривой

$$D = 2T - K.$$

Все элементы кривой можно вычислить по вышеприведенным формулам. Но так как T , K , B и D находятся в прямой зависимости от угла поворота и радиуса, то для их определения составлены специальные таблицы для разбивки кривых.

12.2. Вычисление пикетажа главных точек круговой кривой

Вычислить пикетажные значения главных точек кривой – значит узнать, на каких пикетах и плюсовых точках они находятся.

Сначала определяют пикетаж вершины угла поворота VU , а затем находят пикетажное значение начала, конца и середины кривой

$$НКК = VU - T,$$

$$ККК = НКК + K,$$

$$СКК = НКК + \frac{1}{2} K.$$

Для контроля вторично вычисляют пикетажное значение конца кривой

$$ККК = VU + T - D.$$

Пример (рис. 84)

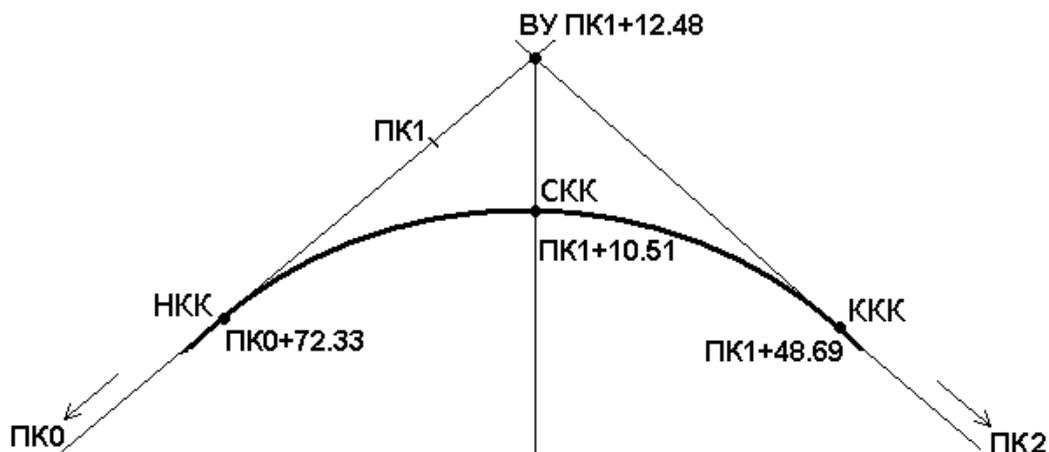


Рис. 84. Разбивка пикетажа с учетом кривой

Определены: пикетаж VU ПК1+12.48 и основные элементы круговой кривой:

$$U = 43^\circ 45';$$

$$R = 100 \text{ м};$$

$$T = 40.15 \text{ м};$$

$$K = 76.36 \text{ м};$$

$$B = 7.76 \text{ м};$$

$$D = 3.94 \text{ м.}$$

Найти пикетажные значения НКК, ККК, СКК.

Расчет пикетажа главных точек кривой выполняется в следующей форме:

		Контроль
_ ВУ	ПК1+12.48	ВУ ПК1+12.48
Т	ПК0+40.15	+ Т ПК0+40.15
		ПК1+52.63
+ НКК	ПК0+72.33	- Д ПК0+03,94
К	ПК0+76.36	ККК ПК1+48.69
НКК	ПК0+72.33	
+ $\frac{1}{2}K$	ПК0+38.18	
СКК	ПК1+10,51	

12.3. Разбивка кривой в главных точках на местности

Разбить кривую в главных точках на местности – значит найти положение её главных точек на оси линейного сооружения и закрепить их. Положение начала кривой НКК определяют, отложив вычисленное расстояние от ближайшего пикета.

В нашем примере (см. рис. 84) ближайшим пикетом является ПК1. От него к ПК0 откладывают расстояние 27,67. В этой точке забивают колышек, а на расстоянии 15 – 20 см по направлению трассы забивают сторожок и на нем записывают НКК ПК0 + 72.33.

Середину кривой СКК закрепляют, отложив от ВУ по направлению биссектрисы угла, образованного направлениями трассы, отрезок, равный B .

На следующем, после вершины угла, направлении трассы откладывают величину домера (см. рис. 83), после чего продолжают разбивку пикетажа. При этом в месте отложения домера две точки – начало домера и его конец получают одно и тоже пикетажное наименование, благодаря чему в конце кривой пикетаж совпадает с пикетажем прямой. Положение ККК получают, отложив от конца домера расстояние $T - D$, в примере оно равно 36.21 м. Найденное положение ККК закрепляют колышком и сторожком.

12.4. Детальная разбивка круговой кривой

По трем главным точкам точно построить кривую на местности невозможно, поэтому при строительстве трассы её обозначают рядом до-

полнительных точек. Данные работы называются **детальной разбивкой кривой**.

Расстояние между соседними точками на кривой K при детальной разбивке зависит от её радиуса R и характера сооружения, однако чем меньше R кривой, тем меньше значение K . При $R > 500$ м разбивку производят через промежутки $k = 20$ м, при $500 > R > 100$ м $k = 10$ м, при $R < 100$ м $k = 5$ м.

Из всех существующих способов детальной разбивки, различающихся между собой по виду измерений и условиям использования, рассмотрим два способа.

Способ прямоугольных координат от тангенсов

Пусть M – начало кривой радиуса R (рис. 85). Примем тангенс MA за ось абсцисс, а радиус MO за ось ординат. Положение точки кривой 1 в принятой системе координат определяется абсциссой X_1 и ординатой Y_1 .

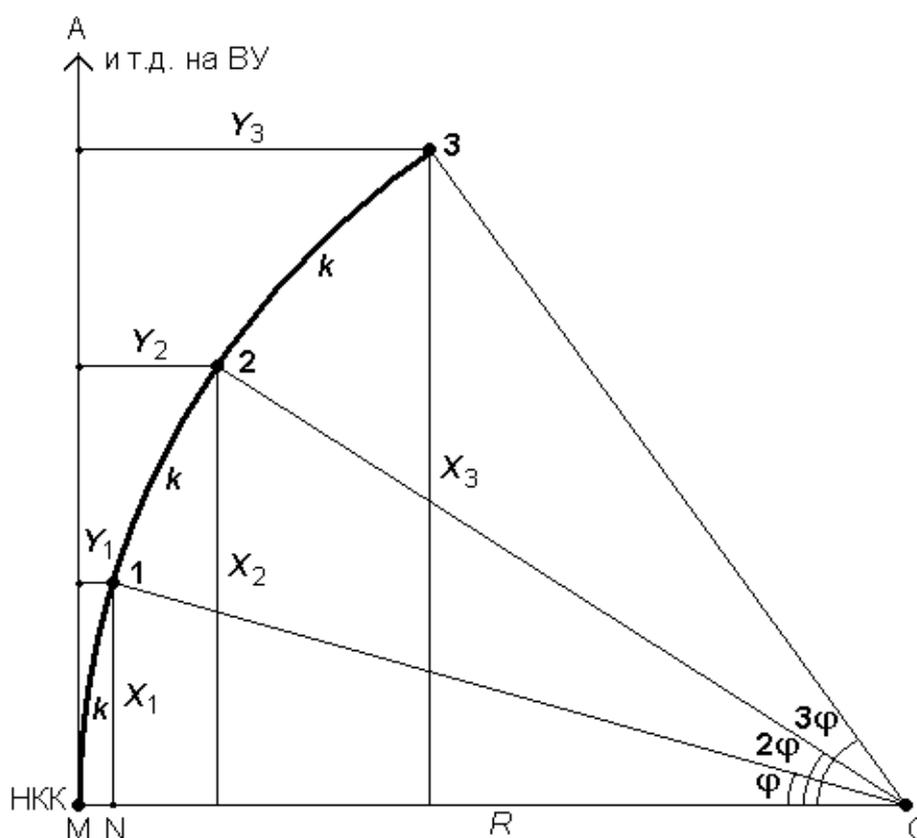


Рис. 85. Способ прямоугольных координат от тангенсов

Из прямоугольного треугольника ON1 находим

$$X_1 = R \sin \varphi \text{ и } Y_1 = R - R \cos \varphi = 2R \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Если условимся производить разбивку через промежутки с длиной дуги k , то получим

$$\varphi = \frac{360^\circ k}{2\pi R} = \frac{180^\circ}{\pi R} k.$$

Тогда для точек 2, 3 и т. д. координаты вычисляют, подставляя в вышеприведенные формулы углы 2φ , 3φ и т. д.

$$X_2 = R \sin 2\varphi, \quad Y_2 = 2R \sin^2 \varphi,$$

$$X_3 = R \sin 3\varphi, \quad Y_3 = 2R \sin^2 \frac{3\varphi}{2}.$$

По указанным формулам составлены таблицы, из которых по аргументам R и k можно выбрать значение X и Y .

В виду того, что значения k и X близки между собой, в таблицах часто вместо графы X дают значения $(k - X)$, называемые «кривая без абсциссы». Разбивку кривой производят с двух сторон – от начала и конца к середине кривой. По тангенсам отмеряют значение k и от полученной точки в обратном направлении откладывают значение $(k - X)$. Из данной точки восстанавливают перпендикуляр и откладывают на нём ординату Y .

Достоинство способа прямоугольных координат состоит в том, что каждая точка кривой выносится независимо от других с примерно одинаковой точностью.

Детальную разбивку кривой способом прямоугольных координат удобно проводить в открытой и непересеченной местности.

Детальная разбивка кривой способом углов и хорд

Данный способ основывается на том, что углы с вершиной в какой-либо точке круговой кривой, образованные касательной и секущей и заключающие равные дуги, равны половине соответствующего центрального угла (рис. 86).

Для разбивки кривой **при помощи углов и хорд вычисляют** центральный угол φ , опирающийся на хорду s

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{s}{2R}.$$

Рассчитывают углы φ_i между касательной и направлением на определяемые точки

$$\varphi_i = i \cdot \frac{\varphi}{2}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n).$$

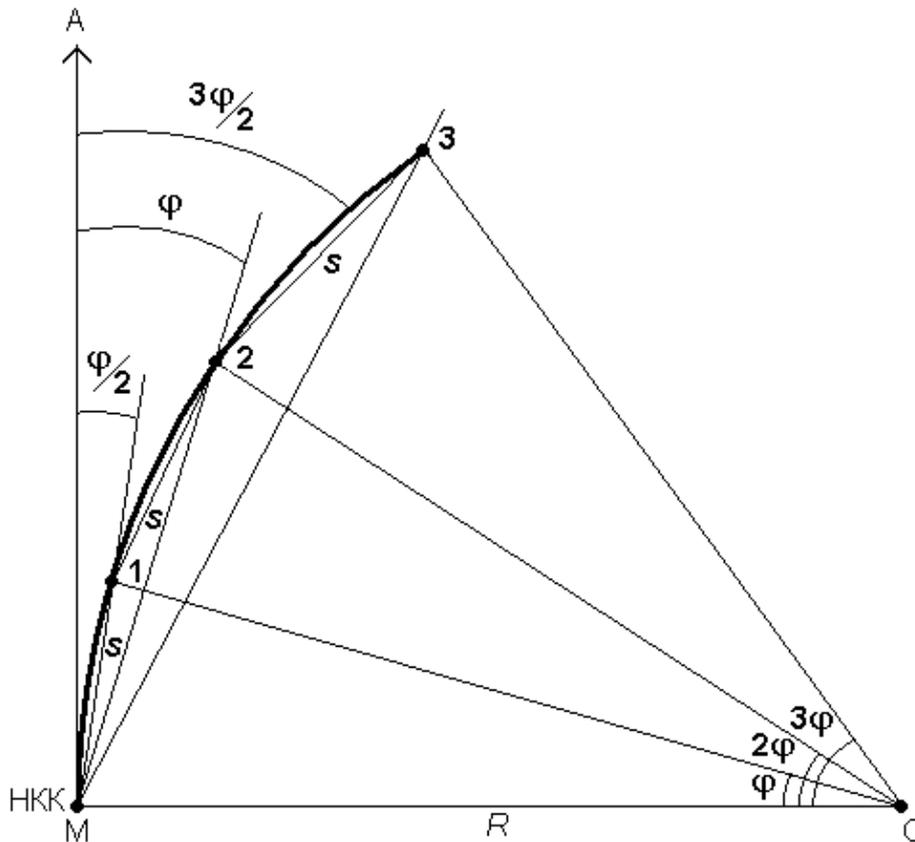


Рис. 86. Способ углов и хорд

Сначала выполняют разбивку кривой от её начала НКК до середины СКК. Для этого теодолит устанавливают в начале кривой НКК, совмещают нуль алидады с нулем лимба и вращением лимба направляют визирную ось по тангенсу. Затем, освободив алидаду, в сторону кривой откладывают от тангенса угол $\varphi_1 = \frac{\varphi}{2}$ и по направлению луча визирования отмеряют лентой заданное расстояние s . Так находят точку 1. После этого откладывают угол $\varphi_2 = \varphi$, а ленту переносят и совмещают её нуль с точкой 1. Взявшись пальцем у деления, равного s , вращают ленту вокруг точки 1 в сторону кривой до тех пор, пока деление не попадет на луч визирования. В данном месте отмечают точку 2. Продолжают действовать в той же последовательности, откладывая точку 3 и т. д.

Аналогичным образом выполняют разбивку кривой от её конца ККК до середины СКК.

В рассмотренном способе линейные измерения выполняют вблизи кривой, что выгодно при разбивке точек в стесненных условиях, напри-

мер, на насыпи. Но так как положение последующей точки получают относительно предыдущей, то с возрастанием длины кривой точность её детальной разбивки быстро падает. В этом главный недостаток способа углов и хорд.

12.5. Вынос пикетов на кривую

Так как при разбивке пикетажа на трассе мерзтики перемещаются по тангенсам кривых, то возникает необходимость выноса пикетов, расположенных на тангенсах, на кривые. Вынос пикетов на кривые выполняется способом прямоугольных координат и в принципе не отличается от детальной разбивки кривой с помощью данного способа. Разница лишь в том, что при детальной разбивке кривой необходимые данные берут из таблиц, в которых они даются через определенные расстояния по кривой (20, 10, 5 или 1 м). При выносе пикетов с касательной (тангенса) на кривую такие данные находят также из таблиц, но при этом используют метод интерполирования.

Например, ПК1 лежит на тангенсе (рис. 87). Для того, чтобы его вынести на кривую, вычисляют расстояние K от ПК1 до НКК. Оно равно 27,67 м.

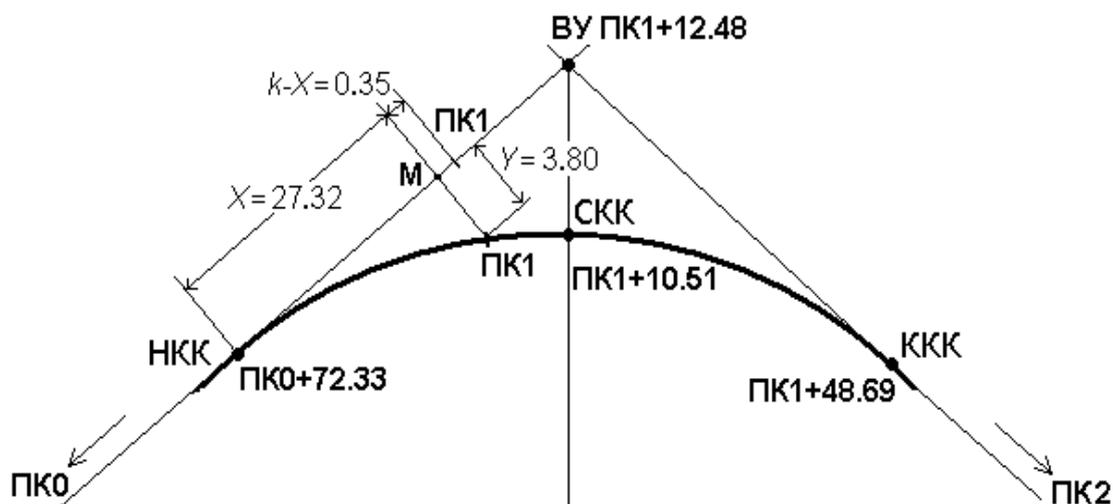


Рис. 87. Вынос пикетажной точки с тангенса на кривую.

Из таблиц при $R = 100$ м для $K = 27,67$ м путем интерполяции определяют $X = 27,32$ м и $Y = 3,80$ м. Затем рулеткой от НКК в сторону ПК1 по тангенсу отмеряют $X = 27,32$ м и из точки М по перпендикуляру откладывают ординату $Y = 3,80$ м.

Основание перпендикуляра М можно определить, отложив от ПК1 в направлении НКК отрезок $(k - X) = 0,35$ м.

В конце ординаты забивают кол и с тангенса в данное место на кривой переносят сторожок. Подобным образом выносят на кривую и другие пикеты до СКК.

Вынос пикета на кривую, когда она находится на втором тангенсе, производят аналогично, только за начало координат в данном случае принимают конец кривой.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое круговая кривая и для чего она устраивается на трассе?
2. Как называются основные элементы кривой и как они определяются?
3. Какие точки кривой называются главными и как находят их пикетажное значение?
4. Как находят положение главных точек кривой на местности?
5. Для чего выполняется детальная разбивка кривой?
6. Как выполняют детальную разбивку кривой способом прямоугольных координат от тангенсов?
7. Как выполняют детальную разбивку кривой способом углов и хорд?
8. Как производят вынос пикетов на кривую?

Лекция 13

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ КРИВЫЕ

План лекции

13.1. *Переходная кривая*

13.2. *Железнодорожная кривая, её элементы и главные точки*

13.3. *Вычисление пикетажа главных точек железнодорожной кривой и разбивка кривой в главных точках на местности*

13.1. **Переходная кривая**

Непосредственное сопряжение прямого участка пути с круговой кривой приводит к тому, что во время движения поезда в местах сопряжения внезапно возникает центробежная сила F (рис. 88), прямо пропорциональная квадрату скорости движения v и обратно пропорциональная радиусу кривой R

$$(F = \frac{mv^2}{R}).$$

Резкое воздействие центробежной силы на подвижной состав и железнодорожный путь, особенно при большой скорости движения, может привести к аварийной ситуации. Чтобы этого не произошло, для постепенного нарастания центробежной силы конечные точки круговых кривых сопрягают с прямыми при помощи так называемых переходных кривых, радиус которых меняется от бесконечности (в начале переходной кривой) до радиуса круговой кривой (в точке сопряжения с последней). Кроме этого, в пределах переходных кривых осуществляют отведение возвышения наружного рельса до отметки внутреннего. Возвышение наружного рельса рассчитывается для каждой кривой в зависимости от среднего веса состава и расчетной скорости движения.

На железных дорогах России переходные кривые строят по радиоидаальной спирали (клотоиде) с изменением кривизны по линейному закону $\rho = \frac{c}{l_n}$, где ρ – переменный радиус кривизны спирали в метрах; c – постоянная величина в квадратных метрах, показывает темп развития радиуса кривизны; l_n – текущая длина переходной кривой.

При длине переходной кривой $l_n = 0$ радиус её кривизны $\rho = \infty$; при l_n , равной проектной длине переходной кривой l , радиус кривизны спирали равен радиусу круговой кривой $\rho = R$.

Переходные кривые принимают стандартной длины от 20 до 200 м, кратные 20 м, в зависимости от радиуса круговой кривой и скорости движения поездов.

При вставке переходных кривых радиус круговой кривой уменьшается на величину сдвижки. Чтобы при сопряжении переходной и круговой кривых радиус последней не уменьшался, предусматривается смещение центра круговой кривой проектного радиуса внутрь по биссектрисе угла, образованного направлениями трассы.

На схеме (рис. 89) показаны элементы переходной кривой: приращение тангенса m , приращение радиуса ρ , приращение кривой T_ρ и приращение биссектрисы B_ρ , которые вычисляют по формулам

$$m = \frac{l}{2} \left(1 - \frac{l^2}{120R^2} \right),$$

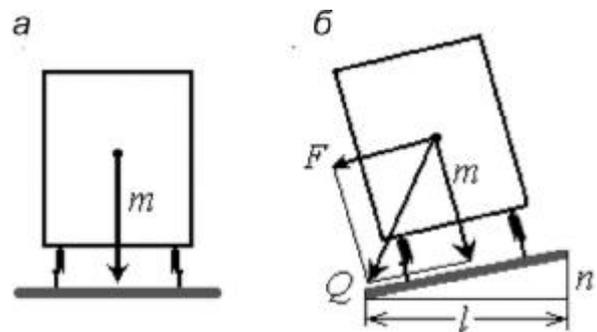


Рис. 88. Силы, действующие на состав на прямом (а) и кривом (б) участке железнодорожного пути

$$p = \frac{l^2}{24R} \left(1 - \frac{l^2}{112R^2} \right),$$

$$T_p = p \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2},$$

$$B_p = p \cdot \operatorname{sec} \frac{\gamma}{2}.$$

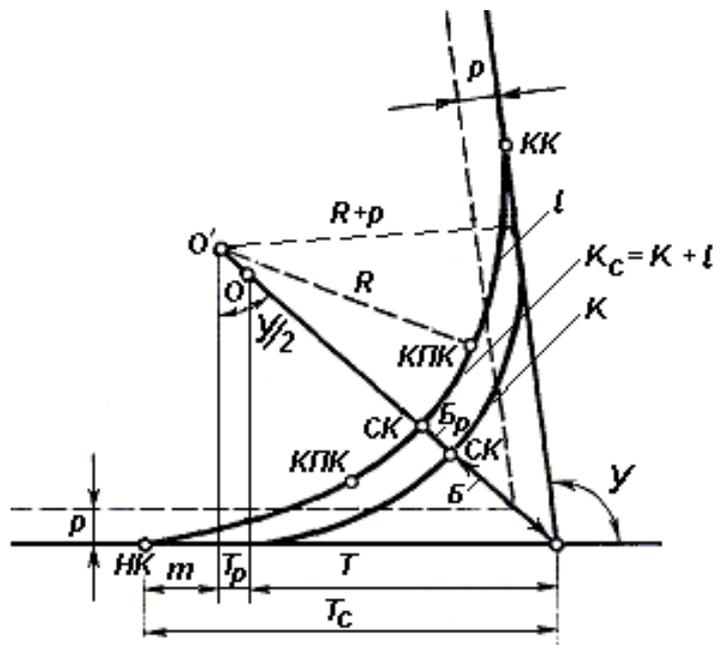


Рис. 89. Схема круговой и переходной кривых

При устройстве переходной кривой центр круговой кривой смещается на величину p , а точки начала и конца кривой на величину m .

13.2. Железнодорожная кривая, её элементы и главные точки

В соответствии с нормами проектирования железных дорог на закруглениях трассы должны устраиваться железнодорожные кривые в виде сочетания круговой кривой с двумя переходными кривыми (см. рис. 89).

Железнодорожная кривая имеет 6 главных точек и 7 элементов.

К главным точкам относятся:

1. ВУ – вершина угла.
2. НК – начало железнодорожной кривой.

3. КК – конец железнодорожной кривой.
4. СК – середина железнодорожной кривой.
5. КПК₁ – конец переходной кривой первой.
6. НПК₂ – начало переходной кривой второй.

Элементами железнодорожной кривой являются:

1. $У$ – угол поворота кривой (рассчитывается).
2. R – радиус круговой кривой (выбирается).
3. l – длина переходной кривой. Выбор её зависит от категории дороги и радиуса кривой.
4. T_c – тангенс железнодорожной кривой определяется по формуле

$$T_c = T + T_p + m.$$

5. K_c – длина железнодорожной кривой

$$K_c = K + l.$$

6. B_c – биссектриса железнодорожной кривой

$$B_c = B + B_p.$$

7. D_c – домер железнодорожной кривой

$$D_c = 2T_c - K_c,$$

$$\begin{aligned} D_c &= 2(T + T_p + m) - (K + l) = 2T + 2T_p + 2m - K - l = \\ &= 2T - K + 2T_p - 2 \cdot 0.5l + 2m = D + 2T_p - 2(0.5l - m). \end{aligned}$$

13.3. Вычисление пикетажа главных точек железнодорожной кривой и разбивка кривой в главных точках на местности

Вычисление пикетажа главных точек железнодорожной кривой выполняется по тем же формулам, что и для круговой кривой.

При необходимости вычисляют пикетажное значение точек конца и начала переходных кривых по формулам

$$КПК_1 = НК + l \text{ и } НПК_2 = КК - l.$$

Разбивку кривой в главных точках на местности производят также, как и для круговой кривой.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое переходная кривая? Как и для чего она устраивается?
2. Какие элементы у переходной кривой?
3. Чем железнодорожная кривая отличается от круговой кривой?
4. Какими элементами и главными точками характеризуется железнодорожная кривая?
5. Как определяются элементы железнодорожной кривой?

Лекция 14

НИВЕЛИРОВАНИЕ ТРАССЫ

План лекции

- 14.1. Закрепление трассы по высоте.
- 14.2. Задачи нивелирования.
- 14.3. Работа с нивелиром на станции.
- 14.4. Нивелирование оврагов.
- 14.5. Нивелирование поперечников.
- 14.6. Нивелирование через реку.
- 14.7. Контроль нивелирования трассы.

14.1. Закрепление трассы по высоте

Вдоль всей разбитой на местности трассы, но за пределами зоны работ закрепляются точки, называемые **реперами**. Они могут быть временными и постоянными. **Временные реперы** – это столбы, закапываемые ниже глубины промерзания. Внизу закрепляется крестовина. Такой репер называется временным грунтовым. В качестве временного репера можно использовать пни деревьев диаметром 0,5 м и более. Временные реперы размещают по трассе через каждые 2–3 км, а через 20–30 км устраивают **постоянные реперы**. Особенно необходимо их устраивать в начале и в конце трассы, на станциях, вблизи будущих мостов и тоннелей. Постоянные реперы могут быть *стенными* или *грунтовыми*.

14.2. Задача нивелирования

Целью нивелирования трассы является получение отметок пикетов, плюсовых и точек поперечников для построения продольного и поперечного профилей трассы. Его выполняют вслед за разбивкой пикетажа и установкой реперов. Нивелирование ведут из середины с расстоянием от нивелира до реек 50 – 100 м.

Бригада по нивелированию состоит из нивелировщика, записатора и двух реечников.

В снаряжение бригады входят нивелир со штативом, две двусторонние рейки, два переносных фиксатора (башмака), журнал нивелирования. Запрещается производить нивелирование без поверки нивелира и реек.

Чтобы не пропустить пикеты и плюсовые точки, нивелировщик должен иметь пикетажный журнал трассы.

14.3. Работа с нивелиром на станции

Для определения превышений между связующими точками, на каждой станции нивелир устанавливают посередине между ними (рис. 90). За связующие точки принимают пикеты или плюсовые точки, но чтобы расстояние между ними не более 150 м, а превышения несколько меньше длины рейки. При этом для контроля превышения на станции в комплект должны входить две рейки с разностью по красным сторонам реек на 100 мм. Например, одна рейка с началом отсчета 4687 мм, а вторая – 4787 мм.

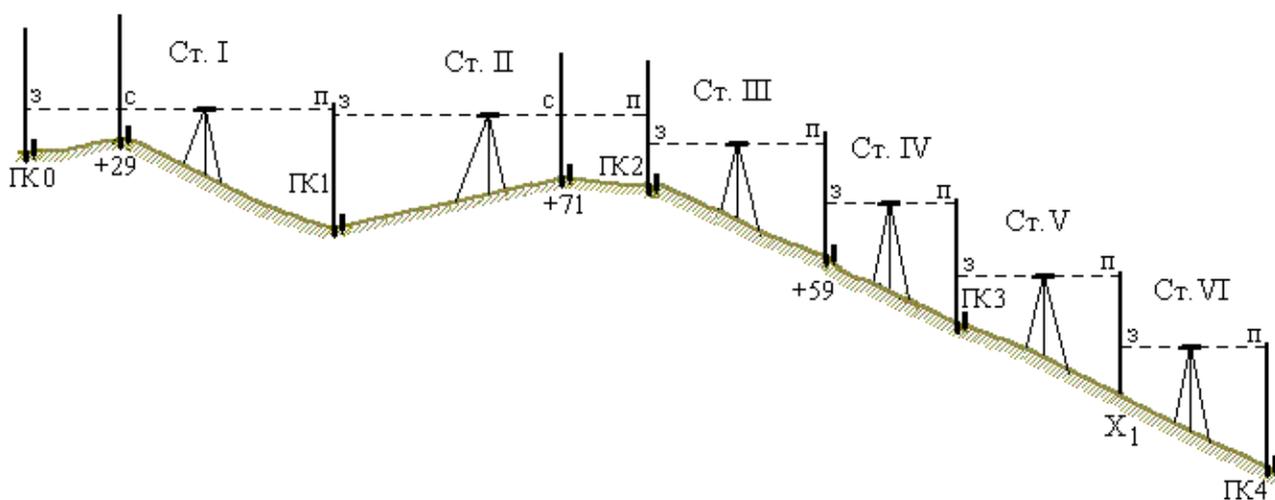


Рис. 90. Нивелирование трассы

Отсчеты по рейкам, установленным на связующие точки, берут в следующей последовательности:

- 1) по черной стороне рейки на заднюю точку $З_з$;
- 2) по красной стороне рейки на заднюю точку $З_к$;
- 3) по черной стороне рейки на переднюю точку $П_з$;
- 4) по красной стороне рейки на переднюю точку $П_к$.

Вычисляют превышения

$$h_з = З_з - П_з,$$

$$h_k = z_k - \Pi_k \pm 100 \text{ мм.}$$

Если полученные превышения оказались равными или отличаются не более чем на 5 мм, то из них рассчитывают среднее превышение. В противном случае работу переделывают.

Пример:

$$h_q = 528 - 711 = -183 \text{ мм,}$$

$$h_k = 5213 - 5498 = -285 + 100 = -185 \text{ мм,}$$

$$h_{cp} = -184 \text{ мм.}$$

Если между связующими точками находятся промежуточные (рельефные или контурные) плюсовые точки, задний реечник поочередно ставит на них рейку, и нивелировщик берёт только по её черной стороне промежуточный отсчет C (рис. 90 точки ПК0+29, ПК1+71).

После этого работу на станции заканчивают и переходят на следующую. При этом задний реечник с промежуточной точки переходит на переднюю точку новой станции. Передний реечник остается на месте и на новой станции он будет задним.

На новой станции и на всех последующих работу ведут в таком же порядке.

В зависимости от местных условий за связующие точки берут и плюсовые. Например, на станциях III и IV (рис. 90) за связующую принята плюсовая точка ПК2+59.

На крутых склонах, где превышение между пикетами больше 3 м, приходится ставить дополнительные связующие точки. Например, пикет ПК3 и ПК4 лежат на ровном крутом скате и превышение между ними больше длины рейки. В этом случае превышение между пикетами измеряют по частям, введя дополнительную связующую точку, называемую *икс-точкой*. Рейку в *икс-точке* ставят на колышек или переносной башмак. На очень крутых склонах ставят несколько *икс-точек*. На профиль *икс-точки* не наносят и расстояния от них до пикетов не измеряют. Они служат только для передачи превышений.

14.4. Нивелирование оврагов

Если нивелирный ход пересекает узкий (до 100 м) овраг с крутыми скатами, то во избежание накопления ошибок при спуске в овраг и при подъеме из него передают высоту сразу с одного берега на другой (рис. 91).

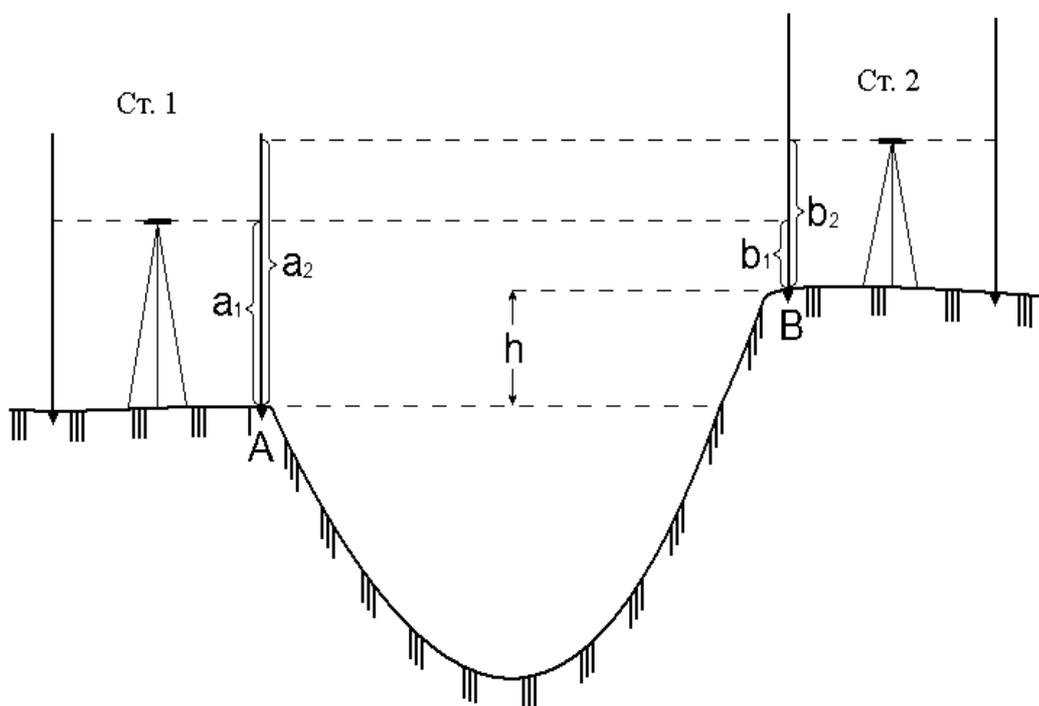


Рис. 91. Нивелирование через овраг

Для этого с двух станций 1 и 2 нивелируют точки А и В на каждом берегу оврага. Превышение между этими точками вычисляют дважды

$$h_1 = a_1 - b_1,$$

$$h_2 = a_2 - b_2.$$

Расхождение между значениями h_1 и h_2 не должно превосходить 5 мм.

В случае необходимости составления поперечного профиля оврага разбивают пикетаж с закреплением кольями пикетов и плюсовых точек, которые затем нивелируют. Обычно нивелировщик спускается по одному скату оврага, нивелируя точки, расположенные на обоих скатах.

Нивелирование заросших оврагов приходится делать по каждому отрогу отдельно.

Широкие овраги нивелируют также как реки (см. п. 14.6).

14.5. Нивелирование поперечников

Нивелирование поперечников выполняют двумя способами:

- 1) попутно с продольным нивелированием трассы;
- 2) с отдельных станций, самостоятельно.

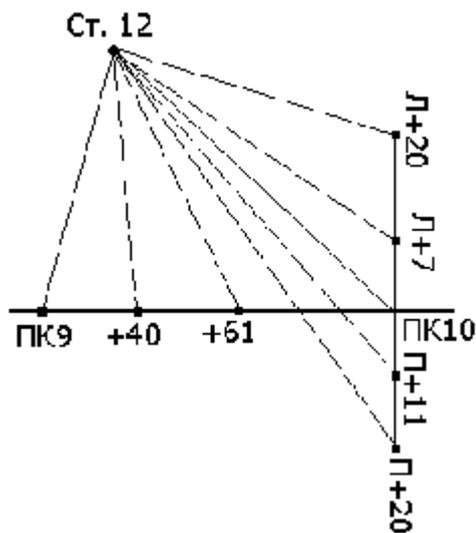


Рис. 92. Нивелирование поперечников

Если поперечники нивелируют попутно с продольным нивелированием, то рейки устанавливают на точки поперечника и берут отсчеты как на промежуточные точки (рис. 92).

При отдельном нивелировании нивелир устанавливают в таком месте, чтобы с одной станции можно было прочесть отсчеты по рейкам на возможно большем числе точек одного, двух, а то и трех поперечников.

Отсчеты берут только по черной стороне рейки. При этом исходной (задней) точкой служит пикет или плюсовая точка трассы, зная высоту которой вычисляют горизонт нивелира.

14.6. Нивелирование через реку

При ширине реки до 150 метров нивелирование ведут обычным порядком, от 150 до 300 м отметки с одного берега на другой передают следующим образом (рис. 93).

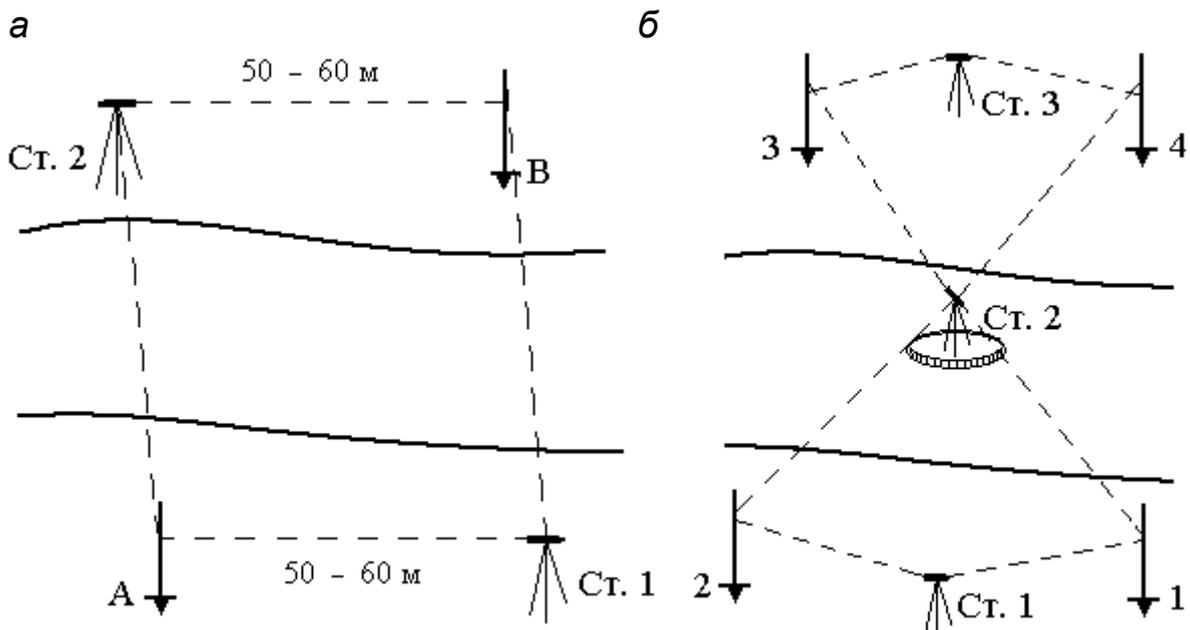


Рис. 93. Нивелирование широких рек

На обоих берегах выбирают точки А и В не ниже 2 м над поверхностью воды и закрепляют их временными реперами. В 50 – 60 м от этих точек выбирают станции 1 и 2 так, чтобы линии ст. 1 – А и ст. 2 – В были приблизительно параллельны, а расстояния ст. 1 – В и ст. 2 – А равны.

В точках А и В ставят двусторонние рейки, а на станции 1 – нивелир. По рейке в точке А берут отсчеты по черной и красной сторонам, затем берут отсчеты по двум сторонам рейки в точке В. Не меняя фокусировку трубы нивелира, переезжают через реку, ставят нивелир на станции 2 и берут отсчеты по двум сторонам рейки в точке А, а затем в точке В. Значение превышения точки А над точкой В вычисляют дважды и берут среднее, если разность превышений не будет более 10 мм на 100 м расстояния.

Если по середине реки есть остров или мель (рис. 93, б), станцию выбирают на них и при длине луча до 100 м нивелируют обычным порядком.

При большей длине визирного луча на одном берегу закрепляют точки 1 и 2, на втором – 3 и 4. Нивелир ставят на станцию 1, берут отсчеты по рейкам 1 и 2 (по черной и красной сторонам) и переносят его на остров на станцию 2. На острове нивелируют все четыре точки, после этого нивелир переносят на второй берег. Со станции 3 нивелируют точки 3 и 4. Для контроля находят по два значения превышений между точками 1 и 2, 3 и 4: одно со станций на берегу, второе – на острове. Если разность значений превышения не более 20 мм, то превышения между точками 2 и 3, 1 и 4 находят из отсчетов по рейке, взятой со станции 2, расположенной на острове.

На более широких реках отметку передают нивелирным ходом, прокладывая его через острова или расположенный в стороне мост, а в зимнее время – по льду.

14.7. Контроль нивелирования трассы

При нивелировании трассы возможны случайные грубые ошибки, например, просчеты по рейке или неправильно установленная рейка. Поэтому при нивелировании должен быть контроль.

Контроль нивелирования всей трассы может выполняться несколькими способами:

1. Нивелирование между реперами с известными отметками.

Если ход проложен между реперами государственной нивелирной сети, то для контроля сравнивают алгебраическую сумму превышений $\sum h$ хода с разностью отметок конечного H_k и начального H_n реперов.

Разность $\Delta h = \sum h - (H_k - H_n)$ должна быть не более допустимой $\Delta h_{доп} = \pm 50\sqrt{L}$ мм, где L – длина хода в километрах.

2. Нивелирование в два нивелира.

Первый нивелировщик нивелирует связующие и промежуточные точки, а второй – идет вслед за ним, нивелируя только связующие точки. Результаты нивелирования сравнивают ежедневно. При большой разности в превышениях выполняют повторное нивелирование.

3. Проложение обратного хода.

Если работу ведут одним нивелиром, то для контроля делают обратный ход. При обратном ходе нивелируют только связующие точки. Станции, где допущены грубые ошибки, нивелируют заново.

4. Нивелирование замкнутым ходом.

Замкнутым называется ход, который начинается и заканчивается в одной точке. Контролем служит условие: алгебраическая сумма превышений хода должна равняться нулю.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое репер и для чего он служит?
2. Каков порядок работы на станции при нивелировании трассы?
3. Как определяют и контролируют превышение на станции?
4. Что такое связующие точки при нивелировании трассы?
5. Когда при нивелировании используют икс-точки?
6. Какие способы нивелирования поперечников существуют?
7. Как выполняют нивелирование через неширокие овраги?
8. Как передают отметку на другой берег реки?
9. Какие применяются способы контроля нивелирования трассы?

ЛЕКЦИЯ 15 **МЕНЗУЛЬНАЯ СЪЕМКА**

План лекции

15.1. Понятие мензульной съемки.

15.2. Комплект мензулы

15.3. Съёмочное обоснование мензульной съемки

15.4. Съёмка ситуации и рельефа местности

15.1. Понятие мензульной съемки

Мензульная съемка связана с получением топографического плана непосредственно в поле. При этом горизонтальные углы не измеряют, как в тахеометрической съемке, а получают из графических построений, поэтому она ещё называется **углоначертательной**.

15.2. Комплект мензулы

Мензуральная съемка выполняется с использованием комплекта приборов и принадлежностей. В мензуральный комплект (рис. 94) входят: мензула с центрировочной вилкой и отвесом, кипрегель, ориентир – буссоль, мензуральная рейка и полевой зонт.

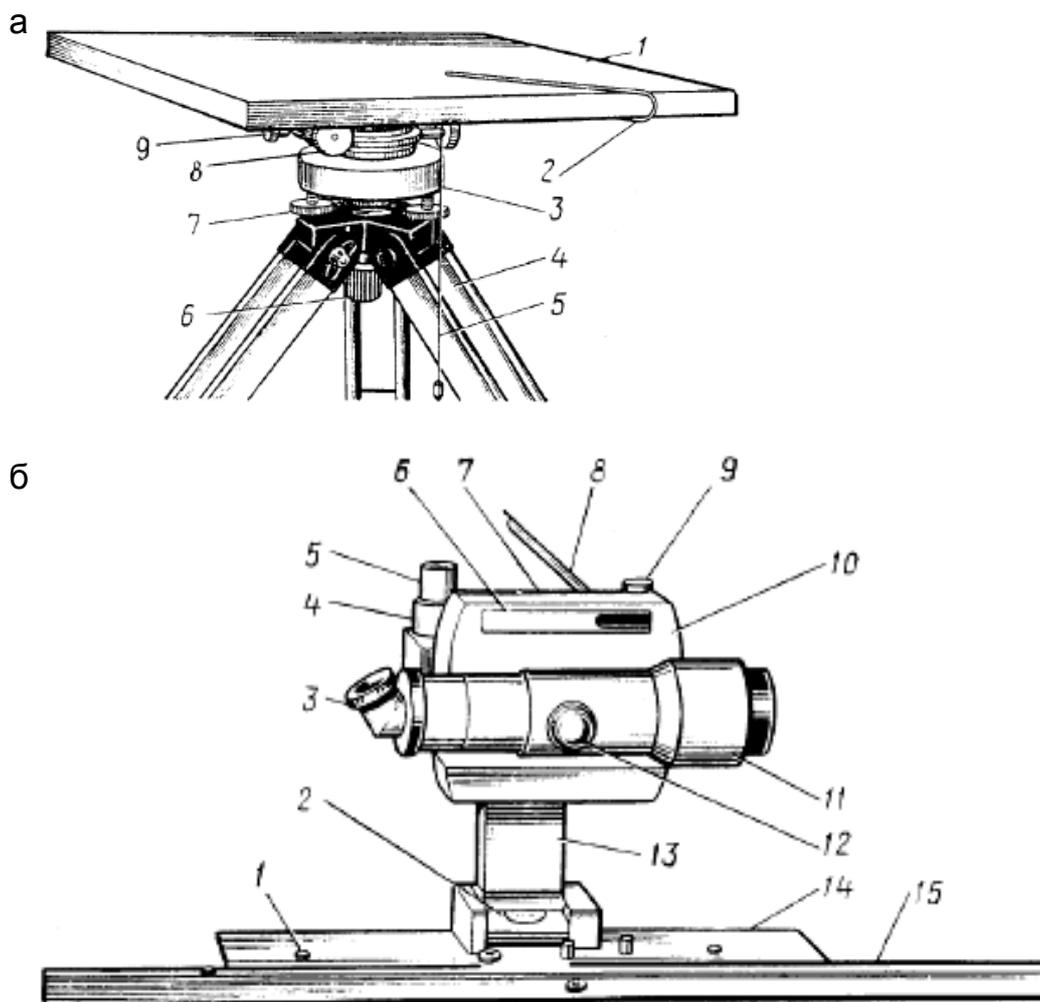


Рис. 94. Мензуральный комплект: а – мензула с центрировочной вилкой: 1 – мензуральная доска-планшет; 2 – мензуральная центрировочная вилка; 3 – подставка; 4 – штатив; 5 – нитяной отвес вилки; 6 – становой винт; 7 – подъемный винт; 8, 9 – наводящий и закрепительный винты подставки; б – кипрегель КН: 1 – масштабная линейка; 2 – уровень при колонке; 3 – окуляр; 4 – закрепительный винт трубы; 5 – наводящий винт трубы; 6 – уровень вертикального круга; 7 – уровень зрительной трубы; 8 – зеркало для наблюдения уровня при трубе; 9 – наводящий винт уровня вертикального круга;

10 – вертикальный круг; 11 – зрительная труба; 12 – кремальера;
13 – колонка; 14 – основание; 15 – дополнительная линейка

Мензула (рис. 94, а) (от лат. mensula столик). Состоит из штатива, подставки и мензульной доски – планшета. На планшете закрепляется ватман, на котором вычерчивают план местности.

Кипрегель (рис. 94, б) (kippen от немецкого опрокидывать и regel линейка) – прибор для съемки местности. Кипрегелем визируют на точки местности, прочерчивая направления на планшете, измеряют вертикальные углы и расстояния или их горизонтальные проложения.

В настоящее время выпускаются кипрегели КН и КНК. Оба кипрегеля авторедукционные. Они определяют превышения и редуцированные на горизонтальную плоскость расстояния.

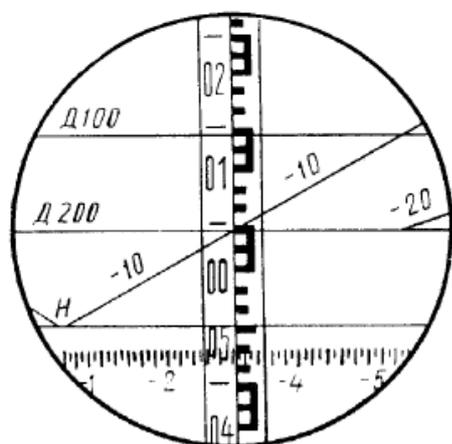


Рис. 95. Поле зрения зрительной трубы кипрегеля КН

Кипрегели имеют следующие части: зрительную трубу, колонку и линейку. Зрительная труба вращается относительно вертикального круга, что позволяет при её наклонах видеть в поле зрения различные участки круга с номограммами кривых (рис. 95).

Номограммы превышений и расстояний нанесены на поверхность стеклянного вертикального круга. Их изображение передается с помощью системы призм в поле зрения трубы и проектируется на изображение местности.

Знак (-) перед коэффициентом кривых превышений показывает понижение местности, а (+) – повышение.

Начальную окружность номограммы обозначают буквой Н с оцифрованными делениями лимба вертикального круга через 1° и не оцифрованными через 5'.

Значение место нуля вертикального круга определяют по формуле

$$МО = \frac{П - Л}{2}.$$

Угол наклона вычисляют по формуле

$$v = \frac{П + Л}{2} = П - МО = Л + МО.$$

Точность измерений кипрегелем КН характеризуется следующими данными: средняя квадратическая ошибка измерения расстояний на 100 м – 20 см; средняя квадратическая ошибка измерения превышений на 100 м от

3 до 15 см в зависимости от величины угла наклона; средняя квадратическая ошибка измерения угла наклона одним приемом – 45".

15.3. Съемочное обоснование мензульной съемки

Мензульную съемку производят на основе опорной геодезической сети. Сеть может быть в виде теодолитных ходов, мензульных ходов, геометрической сети.

Мензульный ход представляет собой ряд закрепленных на местности точек, плановое положение которых на планшете получают графически с помощью мензулы и кипрегеля.

Геометрическая сеть – система треугольников, пункты которых получают на планшете графическим способом. Если с точек созданного съемочного обоснования нельзя полностью выполнить съемку местности, то закрепляют переходные точки. Их положение на планшете получают угловыми засечками.

15.4. Съемка ситуации и рельефа местности

Съемка ситуации и рельефа производится, как и при тахеометрической съемке, полярным способом при вертикальном круге кипрегеля слева от наблюдателя.

Установив мензулу над точкой съемочного обоснования, планшет центрируют, горизонтируют и ориентируют.

Для центрирования планшет предварительно ориентируют на глаз и, действуя ножками штатива мензулы, приводят его в горизонтальное положение. При этом следят, чтобы соответствующая точка планшета находилась примерно над точкой местности.

При съемке 1:2000 и крупнее мензулу центрируют с помощью центрировочной вилки, а при съемке 1:5000 и мельче – на глаз.

Горизонтируют планшет цилиндрическим уровнем на линейке кипрегеля.

Ориентируют планшет или при помощи ориентир-буссоли или по нанесенному на планшет направлению.

Реечные точки выбирают на характерных местах и над этой точкой отвесно держат дальномерную рейку.

Приложив скошенный край линейки кипрегеля к точке съемочного обоснования, зрительную трубу визируют на снимаемую точку и берут расстояние S и превышение h по номограммам. После снятия нескольких точек вычерчивают ситуацию, а по высотам точек производят интерполирование горизонталей.

Выбор речных точек (пикетов) делается так же, как и при тахеометрической съемке. В процессе съемки ежедневно после полевых работ заполняют кальку высот, нанося на неё все речные точки с их высотами, и составляют кальку контуров ситуации.

Кальки необходимы для контроля вычерчивания планшетов и восстановления случайно стертых точек на планшете во время полевых работ.

Мензуральная съемка с одновременной съемкой ситуации и рельефа в настоящее время применяется редко, обычно её используют для съемки рельефа на готовых контурных планах или фотопланах, т. е. при производстве комбинированной съемки местности.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. В чем состоит цель мензуральной съемки?
2. Какие приборы входят в комплект мензулы?
3. Какие виды съемочного обоснования могут быть созданы при мензуральной съемке?
4. Для каких масштабов съемки можно центрировать мензулу центральной вилкой и на глаз?
5. Каковы преимущества и недостатки мензуральной съемки?

Лекция 16 ФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

План лекции

- 16.1. Фотограмметрия и её назначение
- 16.2. Аэрофотосъемка
- 16.3. Аэрофотосъемочная аппаратура
- 16.4. Аэрофотоснимок и карта. Их отличия и сходство

16.1. Фотограмметрия и её назначение

Фотограмметрия (от греч. слов photos свет, gramma запись, metroo измерение) – это наука определения количественных и качественных характеристик по снимкам.

Различают следующие виды фотограмметрических съемок:

1. Наземная фотосъемка.
2. Аэрофотосъемка.
3. Космическая фотосъемка.

Наземная фотосъемка применяется в основном при создании карт горных районов, карьеров. При этом применяются специальные приборы

– фототеодолиты, которые устанавливаются на штативе и поэтому их называют фототеодолиты.

Аэрофотосъемку широко применяют для создания топографических карт и планов различных масштабов (1:500 – 1:100 000). Аэрофотосъемка позволяет намного повысить производительность труда и экономическую эффективность топографо-геодезического производства и инженерно-геодезических изысканий.

16.2. Аэрофотосъемка

Аэрофотосъемка – комплекс летно-съёмочных работ, фотографических и фотограмметрических работ, в результате которых получают аэронегативы и аэрофотоснимки местности.

При аэрофотосъемке используются различные летательные аппараты: самолеты, вертолеты, дельтапланы и т. п.

В зависимости от положения оптической оси аэрофотоаппарата в пространстве различают плановое и перспективное фотографирование.

Плановым называется такое фотографирование, при котором оптическая ось аэрофотоаппарата отклоняется от отвесной линии не более, чем на 3° . Если это отклонение превышает 3° , то такая аэрофотосъемка называется **перспективной** или **наклонной**.

При топографической аэрофотосъемке основным видом фотографирования является плановое.

Аэрофотосъемка подразделяется на одиночную, маршрутную и площадную.

Одиночной называется аэрофотосъемка при которой получают один или несколько снимков.

Маршрутной называется аэрофотосъемка полосы местности с одного захода самолета. При этом аэрофотоснимки взаимно перекрывают друг друга в направлении полета.

Площадной называется аэрофотосъемка значительной площади земной поверхности путем проложения нескольких прямолинейных и взаимно параллельных маршрутов. При этом аэрофотоснимки соседних маршрутов перекрываются (рис. 96).

Перекрытие аэрофотоснимков в направлении маршрута съемки называется **продольным** и обозначается буквой *p*.

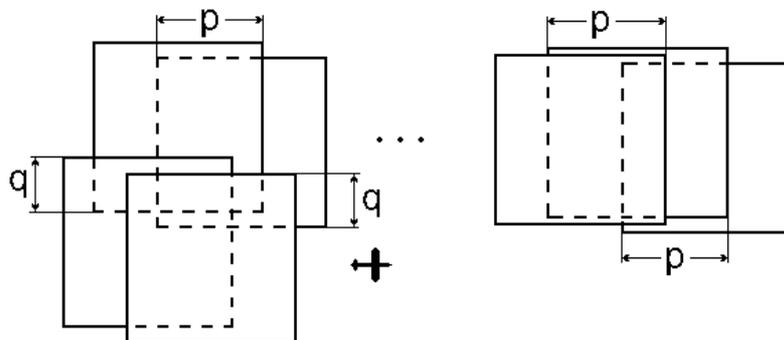


Рис. 96. Продольное и поперечное перекрытие

Перекрытие аэрофотоснимков смежных маршрутов называется **поперечным** и обозначается буквой q .

Величины перекрытий выражаются в процентах относительно размера соответствующей стороны аэрофотоснимка.

Продольное и поперечное перекрытие необходимо для связи аэрофотоснимков в общую систему при их фотограмметрической обработке.

16.3. Аэрофотосъемочная аппаратура

При аэрофотосъемке снимки местности получают аэрофотоаппаратами (АФА), принципиальная схема устройства которых показана на рис. 97.

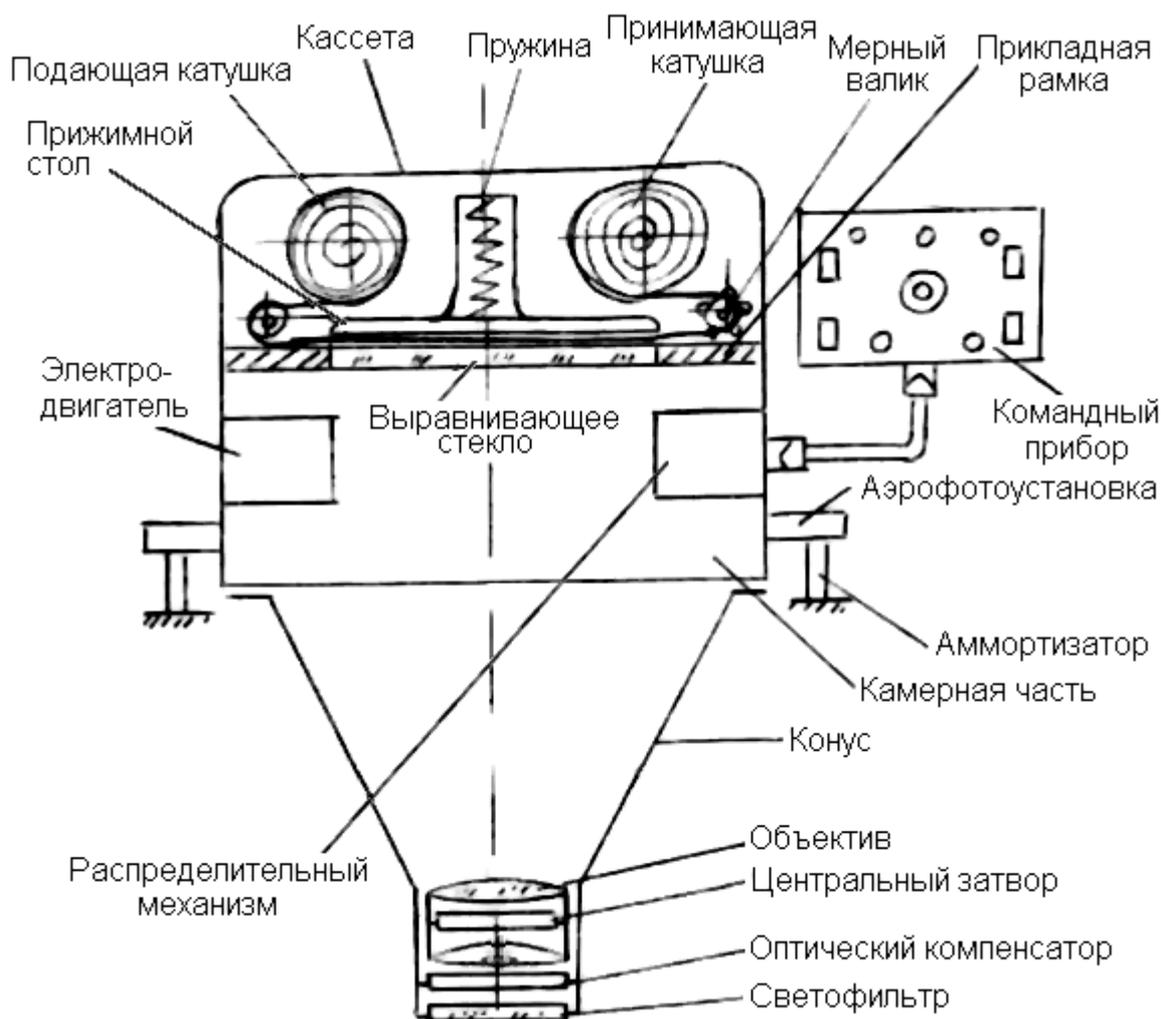
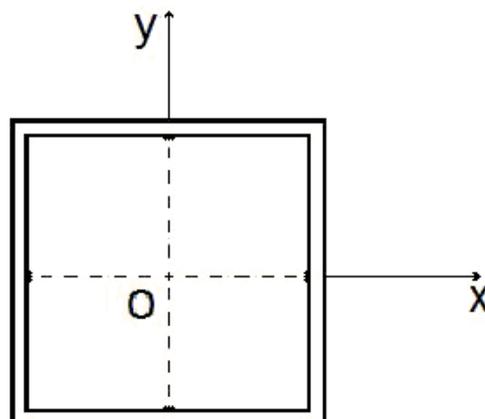


Рис. 97. Аэрофотоаппарат

Объектив аэрофотоаппарата должен давать резкое и геометрически правильное изображение. Современные аэрофотоаппараты являются полными автоматами. Они производят серию аэрофотоснимков через заданный промежуток времени, при этом величина экспозиции автоматически меняется из-за различной освещенности местности, автоматическую перемотку аэропленки, её выравнивание и т. д.

Кроме АФА, при аэрофотосъемке применяют вспомогательные приборы, которые позволяют определить, как были ориентированы аэрофотоснимки в пространстве в момент съемки. К этим приборам относятся **статоскоп** и **радиовысотомер**. Плоскость, в которую выравнивается аэрофотопленка и создается изображение местности, называется **плоскостью прикладной рамки** (рис. 98)



или **фокальной плоскостью аэрофотоаппарата**.

На выравнивающем стекле нанесены координатные метки, определяющие координатную систему каждого снимка, изображение которых фиксируется на аэрофотоснимке. Размер прикладной рамки определяет формат аэрофотоснимка.

При аэрофотосъемке с целью картографирования местности применяют аэрофотоаппараты с форматом снимка 18×18 или 30×30 см.

16.4. Аэрофотоснимок и карта. Их отличие и сходство

Аэрофотоснимок теоретически и практически резко отличается от карты, например, по внешнему виду. Вместе с тем карта и аэрофотоснимок имеют много общего, так как оба эти документа являются изображением местности. Это изображение как на карте, так и на аэрофотоснимке получено в определенном масштабе, которому свойственны размеры изображений тех или иных топографических объектов.

Существенное отличие аэрофотоснимка от топографической карты вытекает из геометрической сущности их получения.

Топографическая карта – ортогональная проекция местности (рис. 99, а), т. е. такая проекция, в которой изображение объектов местности на плоскости получают с помощью проектирующих лучей, перпендикулярных к плоскости проецирования.

Ортогональная проекция характеризуется двумя основными свойствами: расстояния на карте пропорциональны горизонтальным проложением соответствующих расстояний на местности; углы с вершинами в любой точке карты равны соответствующим горизонтальным углам на местности.

В отличие от карты на аэрофотоснимках изображение объектов местности строится проектирующими лучами, пересекающимися в объективе аэрофотоаппарата.

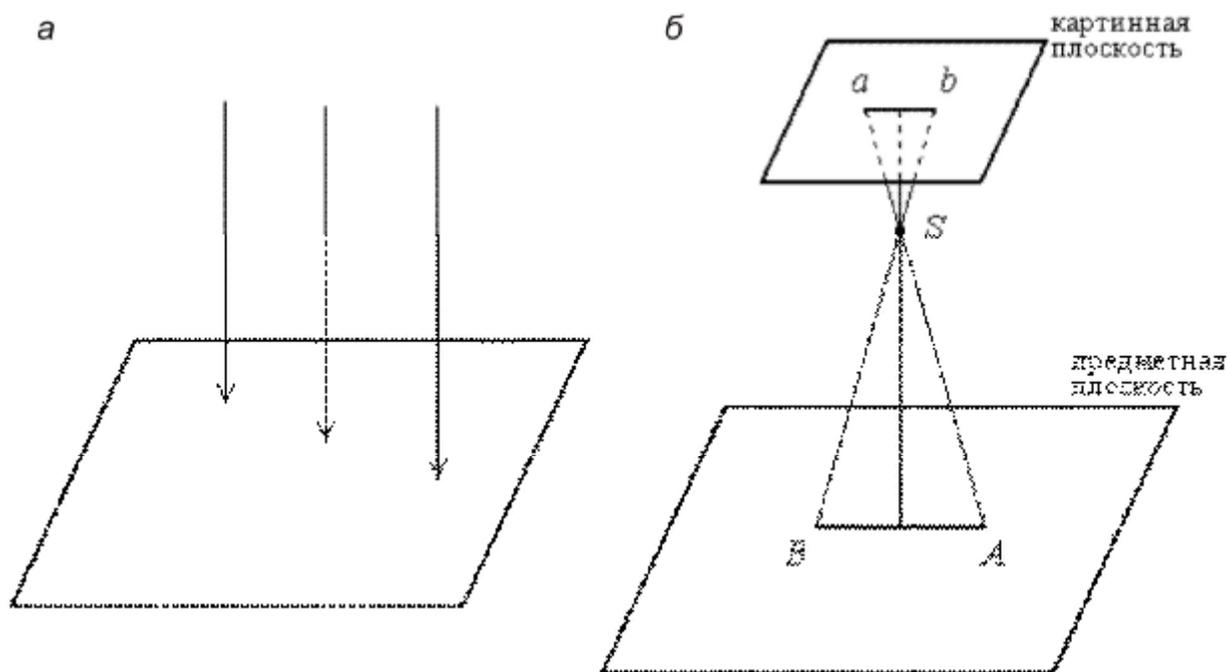


Рис. 99. Проекция: а – ортогональная; б – центральная

Проекция, в которой изображение предметов на плоскости получается с помощью проектирующих лучей, пересекающихся в одной точке, называется центральной (рис. 99, б), а точка пересечения этих лучей – центром проекции. Следовательно, изображение аэрофотоснимка – центральная проекция местности.

Лекция 17.

ФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

План лекции

- 17.1. Летносъёмочные работы.
- 17.2. Масштаб аэрофотоснимка.
- 17.3. Смещение точки на снимке за счет рельефа.
- 17.4. Трансформирование аэрофотоснимков.
- 17.5. Сгущение планов – высотного обоснования аэросъёмки.
- 17.6. Дешифрирование аэрофотоснимков.
- 17.7. Создание топографических карт по аэрофотоснимкам.

17.1. Летносъёмочные работы

Как правило, аэрофотосъёмку выполняют в более мелком масштабе по сравнению с заданным масштабом изготавливаемой карты или плана.

Аэрофотосъемку выполняют так, чтобы продольное перекрытие было не менее 60 %, а поперечное не менее 40 %.

Для обеспечения заданной величины перекрытий необходимо соблюдать базис фотографирования. **Базисом** фотографирования называется расстояние между двумя соседними точками экспозиции, т. е. то расстояние, которое пролетает самолет между двумя закрытыми затворами аэрофотоаппарата. Базис фотографирования вычисляется по формулам

$$B_x = \frac{100 - 60}{100} \cdot a_x \cdot m_0,$$

$$B_y = \frac{100 - 40}{100} \cdot a_y \cdot m_0,$$

где B_x – продольный базис фотографирования по маршруту; B_y – расстояние между осями двух смежных маршрутов; a_x , a_y – размеры продольной и поперечной стороны аэрофотоснимка; m_0 – знаменатель масштаба аэрофотосъемки.

Для облегчения вождения самолета и захода его с маршрута на маршрут заранее намечают на карте хорошо видимые с воздуха ориентиры.

После выполнения аэрофотосъемки, заснятые **кассеты** обрабатывают, и с полученных после проявления и закрепления негативов путем контактной печати изготавливают аэрофотоснимки.

Для проверки лётносъёмочных работ выполняют накидной монтаж, представляющий собой приближенное соединение аэрофотоснимков по их одноименным контурам в одну сплошную картину заснятой местности.

Оценка качества лётносъёмочных работ выполняется по следующим критериям:

- 1) по качеству фотографического изображения;
- 2) величине продольного и поперечного перекрытия;
- 3) уклонению оси фотоаппарата от вертикали;
- 4) прямолинейности маршрута;
- 5) уклонению от заданной высоты полета самолета.

Выявленные недостатки аэрофотосъемки устраняются. Накидной монтаж фотографируют в мелком масштабе – получают репродукцию накидного монтажа. Её используют для предварительного изучения местности.

17.2. Масштаб аэрофотоснимка

Аэрофотоснимок горизонтального участка плоской местности, полученный при отвесном положении оптической оси АФА, представляет

собой контурный план этой местности, пригодный для различных измерений.

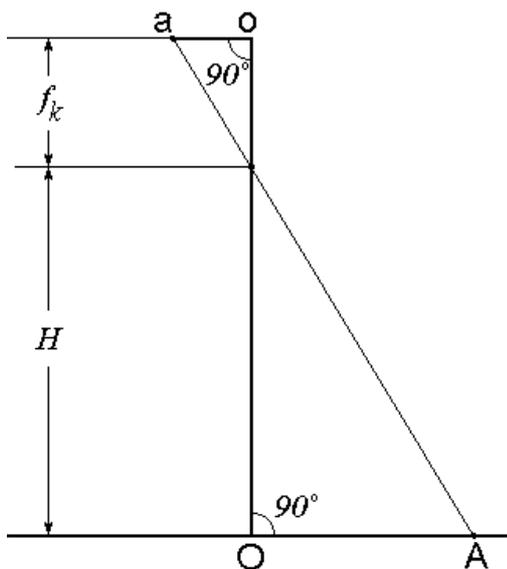


Рис. 100. Масштаб горизонтального аэрофотоснимка

Масштаб такого аэрофотоснимка (рис. 100) называется *горизонтальным*, выражается отношением

$$\frac{1}{m} = \frac{oa}{OA} = \frac{f_k}{H},$$

где m – знаменатель численного масштаба аэрофотоснимка; oa – отрезок на снимке; OA – отрезок на местности; f_k – фокусное расстояние АФА; H – высота полета самолета.

Если же оптическая ось отклонится от отвесного положения, то полученный аэрофотоснимок будет иметь в каждой своей точке разный масштаб. В этом случае можно говорить только о среднем масштабе снимка.

17.3. Смещение точки на снимке за счет рельефа

Проекция вертикали, проходящая через ось объектива называется *точкой надир* и обозначается n (рис. 101). Это самая неискаженная точка на снимке. Точка A изобразится на снимке на расстоянии r от точки n , т. е. $an = r$.

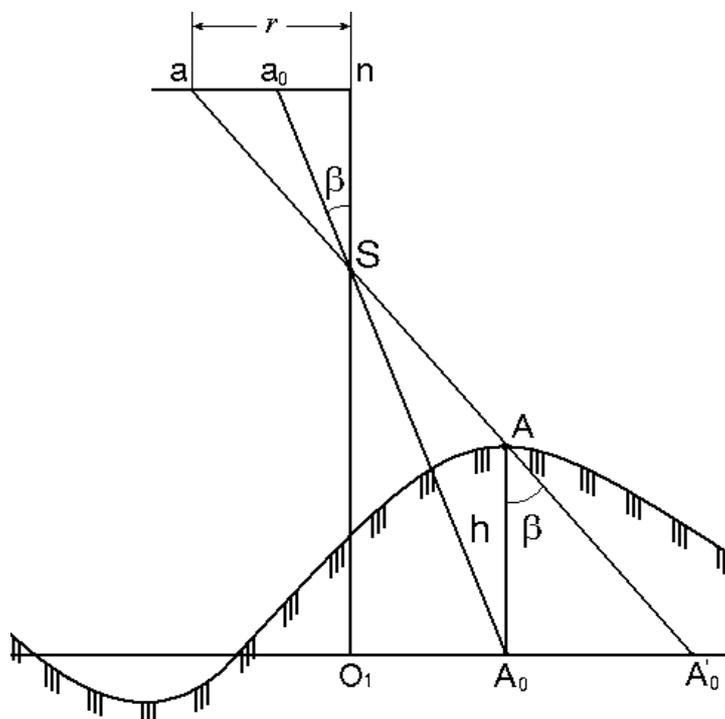


Рис. 101. Смещение изображения точки на аэрофотоснимке обусловленное рельефом местности

Если бы точка A была в плоскости средней уровенной поверхности, то она изобразилась бы в точке a_0 . Следовательно, отрезок a_0a представляет собой смещение точки a , вызванное влиянием рельефа местности. Такое смещение называется *смещением точки за рельеф* и обозначается δ_h .

Непосредственно из рис. 101 получается

$$\delta_h = \frac{h \cdot r}{H},$$

где h – превышение точки местности над средней плоскостью; r – расстояние от главной точки снимка до точки, в которую должна быть введена поправка за рельеф; H – высота полета самолета.

17.4. Трансформирование аэрофотоснимков

Из-за влияния углов наклона при аэрофотосъемке и влияния рельефа местности изображение на аэрофотоснимке не соответствует плану, и поэтому возникает задача трансформирования аэрофотоснимка.

Трансформированием называется преобразование центральной проекции, которую представляет собой аэрофотоснимок, полученный при наклонной проекции главного луча, в другую центральную проекцию, со-

ответствующую отвесному его положению, с одновременным приведением изображения к заданному масштабу.

Наиболее распространен способ трансформирования при помощи особых оптических приборов – *фототрансформаторов*. Он состоит из проекционного фонаря с источником света, объектива, кассеты и экрана, на который проектируется трансформируемый снимок. Фототрансформатор позволяет устранить искажения аэрофотоснимков перемещением и наклоном кассеты и экрана до совпадения четырех ориентирующих точек аэронегатива с одноименными точками опорного планшета. Если после этого вместо планшета на экран положить фотобумагу и переснять негатив, то получают трансформированный снимок.

После трансформирования из рабочих площадей составляют план местности, который называется *фотопланом*.

На фотопланах вся контурная часть представляет собой фотографически уменьшенное изображение предметов и контуров местности. Фотоплан точнее воспроизводит ситуацию местности, чем топографическая карта.

17.5. Сгущение плано-высотного обоснования аэросъемки

Для трансформирования снимков надо иметь на них четыре точки с известными координатами. Эти точки могут быть получены при полевой привязке снимков, но тогда существенно увеличиваются объемы и стоимость работ. Поэтому в полевых условиях производится разряженная привязка, при которой определяются координаты двух – трех точек на маршрут, а плано-высотное положение четырех трансформационных точек каждого снимка получают в камеральных условиях.

Процесс сгущения плано-высотного положения точек может выполняться путем построения специальных сетей фототриангуляции или фотополигонометрии, пункты которых определяют аналитически на электронно-вычислительных машинах, а также путем графического построения.

17.6. Дешифрирование аэрофотоснимков

Распознавание по фотоизображению объектов местности и выявление их содержания с обозначением условными знаками качественных и количественных характеристик называется *дешифрированием*.

Дешифрирование – наиболее важный, ответственный и весьма трудоемкий процесс при изучении местности и явлений по аэрофотоснимкам.

От точности определения положения на фотоизображении дешифрируемых элементов местности, достоверности и полноты их характеристик в значительной степени зависит качество получаемой по фотоснимкам информации.

В зависимости от содержания дешифрирование делится на топографическое и специальное.

При *топографическом* дешифрировании с аэрофотоснимков получают информацию о земной поверхности и элементах местности для составления топографических карт и планов.

При *специальном* дешифрировании отбирают тематическую информацию (геологическую, геоботаническую, об элементах железнодорожного пути и т. п.).

Дешифрирование также разделяют на полевое, камеральное и комбинированное.

Полевое дешифрирование заключается в сличении аэрофотоснимка с местностью. Этот способ обеспечивает наивысшую полноту качества и достоверности результатов дешифрирования. Однако полевое дешифрирование требует значительных затрат времени и средств.

Камеральный способ дешифрирования заключается в анализе фотоизображения объектов местности с использованием всего комплекса признаков дешифрирования. При этом используются альбомы эталонов дешифрирования.

Комбинированный способ сочетает в себе процесс камерального и полевого дешифрирования. Бесспорно распознаваемые объекты местности дешифрируются в камеральных условиях, затем осуществляют полевую доработку сложных участков.

17.7. Создание топографических карт по аэрофотоснимкам

Топографические карты по аэрофотоснимкам создаются комбинированным и стереоскопическими методами.

При *комбинированном методе* контурная часть плана создается с использованием аэрофотоснимков в камеральных условиях, а рельеф снимается в поле при помощи мензулы.

Съемка рельефа выполняется на фотопланах, фотосхемах и на отдельных снимках. Предварительно создается высотное съемочное обоснование, для чего определяются высоты плановых опорных знаков или четких контуров. Параллельно со съемкой рельефа может выполняться дешифрирование.

Фотоплан (фотосхему или отдельный снимок) прикрепляют к планшету и определяют высоты характерных точек рельефа тригонометрическим нивелированием. При равнинном рельефе нивелирование выполняют горизонтальным лучом.

Фотоизображение помогает выбрать характерные точки. Кроме того, на хорошо видимые точки местности рейки не устанавливают, а углы наклона измеряют наведением центра непосредственно на точки.

Расстояние между станцией и характерной точкой определяют по масштабу фотоплана. После определения отметок характерных точек проводят горизонтали.

Съемка рельефа на фотопланах требует в два раза меньше времени, чем при обычной мензуральной съемке.

При *стереофотограмметрических методах* рисовка рельефа выполняется в камеральных условиях. Стереоскопическую модель местности получают на специальных стереоприборах: измерительных стереоскопах, стереокомпараторах, универсальных стереофотограмметрических приборах, монокомпараторах и т. д., а также на экране монитора компьютера.

Различают два способа стереоскопической рисовки рельефа: универсальный и дифференцированный.

При *универсальном способе* при помощи перекрывающихся снимков на стереофотограмметрических приборах создается пространственная модель местности, по которой определяют координаты X , Y , Z любой точки местности. В результате измерений стереомодели при универсальном способе горизонтали автоматически вычерчиваются на бумаге. Для этого используют приборы стереографы, стереограф топокарт.

При *дифференцированном методе* единый процесс создания плана или карты местности разделяется на ряд этапов. Высоты точек рельефа получают в камеральных условиях, путем измерений стереомодели, но горизонтали рисуют на снимках по этим высотам, как и при полевой съемке.

В последнее время широко стали использовать дигитайзеры-преобразователи графической информации в цифровую.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие существуют виды фототопографических съемок?
2. Что такое аэрофотосъемка?
3. Чем аэрофотоснимок отличается от карты?
4. Как определяют масштаб аэрофотоснимка?
5. Что такое трансформирование аэрофотоснимков?
6. Что такое дешифрирование аэрофотоснимков?

7. Какие существуют методы создания топографических карт по аэрофотоснимкам?

Лекция 18

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

План лекции

- 18.1. Понятие о геоинформационных системах
- 18.2. Классификация геоинформационных систем
- 18.3. Основные компоненты геоинформационных систем
- 18.4. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС)
- 18.5. Принцип действия ГПСС

18.1. Понятие о геоинформационных системах

Геоинформационные системы (ГИС) – это автоматизированные системы, основными функциями которых являются сбор, хранение, интеграция, анализ и графическая визуализация в виде карт или схем пространственно-временных данных, а также связанной с ними атрибутивной информации о представленных в ГИС объектах.

ГИС возникли в 1960–70 гг. на стыке технологий обработки информации в системах управления базами данных и визуализации графических данных в системах автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированного производства карт, управления сетями. Интенсивное использование ГИС началось в середине 90-х гг. XX в. В это время появляются мощные и относительно дешевые персональные компьютеры, становится более доступным и понятным программное обеспечение.

В качестве источников данных для создания ГИС служат:

- картографические материалы (топографические и общегеографические карты, карты административно-территориального деления, кадастровые планы и др.). Так как получаемые с карт данные имеют пространственную привязку, они используются в качестве базового слоя ГИС;

- данные дистанционного зондирования (ДДЗ), прежде всего, материалы, получаемые с космических аппаратов и спутников. При дистанционном зондировании изображения получают и передают на Землю с носителей съемочной аппаратуры, размещенных на разных орбитах. Полученные снимки отличаются разным уровнем обзорности и детальности отображения объектов природной среды в нескольких диапазонах спектра (видимый и ближний инфракрасный, тепловой инфракрасный и радиодиапазон). Благодаря этому с применением ДДЗ решают широкий

спектр экологических задач. К методам дистанционного зондирования относятся также аэро- и наземные съемки, и другие неконтактные методы, например гидроакустические съемки рельефа морского дна. Материалы таких съемок обеспечивают получение как количественной, так и качественной информации о различных объектах природной среды;

- результаты геодезических измерений на местности, выполняемые нивелирами, теодолитами, электронными тахеометрами, GPS приемниками и т. д.;

- данные государственных статистических служб по самым разным отраслям народного хозяйства, а также данные стационарных измерительных постов наблюдений (гидрологические и метеорологические данные, сведения о загрязнении окружающей среды и т. д).

- литературные данные (справочные издания, книги, монографии и статьи, содержащие разнообразные сведения по отдельным типам географических объектов).

В ГИС редко используется только один вид данных, чаще всего это сочетание разнообразных данных на какую-либо территорию.

18.2. Классификация геоинформационных систем

ГИС системы разрабатывают и применяют для решения научных и прикладных задач инфраструктурного проектирования, городского и регионального планирования, рационального использования природных ресурсов, мониторинга экологических ситуаций, а также для принятия оперативных мер в условиях чрезвычайных ситуаций и др.

Множество задач, возникающих в жизни, привело к созданию различных ГИС, которые могут классифицироваться по следующим признакам:

- По функциональным возможностям:

- полнофункциональные ГИС общего назначения;

- специализированные ГИС, ориентированные на решение конкретной задачи в какой либо предметной области;

- информационно-справочные системы для домашнего и информационно-справочного пользования.

Функциональные возможности ГИС определяются также архитектурным принципом их построения:

- *закрытые системы* не имеют возможностей расширения, они способны выполнять только тот набор функций, который однозначно определен на момент покупки;

- *открытые системы* отличаются легкостью приспособления, возможностями расширения, так как могут быть достроены самим пользователем при помощи специального аппарата (встроенных языков программирования).

- По пространственному (территориальному) охвату ГИС подразделяются на глобальные (планетарные), общенациональные, региональные, локальные (в том числе муниципальные).
- По проблемно-тематической ориентации – общегеографические, экологические и природопользовательские, отраслевые (водных ресурсов, лесопользования, геологические, туризма и т. д.).
- По способу организации географических данных – векторные, растровые, векторно-растровые ГИС.

18.3. Основные компоненты геоинформационных систем

К основным компонентам ГИС относят: технические (аппаратные) и программные средства, информационное обеспечение.

Технические средства – это комплекс аппаратных средств, применяемых при функционировании ГИС. К ним относятся рабочая станция (персональный компьютер), устройства ввода-вывода информации, устройства обработки и хранения данных, средства телекоммуникации.

Рабочая станция используется для управления работой ГИС и выполнения процессов обработки данных, основанных на вычислительных и логических операциях. Современные ГИС способны оперативно обрабатывать огромные массивы информации и визуализировать результаты.

Ввод данных реализуется с помощью разных технических средств и методов: непосредственно с клавиатуры, с помощью дигитайзера или сканера, через внешние компьютерные системы. Пространственные данные могут быть получены с электронных геодезических приборов, с помощью дигитайзера или сканера, либо с использованием фотограмметрических приборов.

Устройства для обработки и хранения данных интегрированы в системном блоке компьютера, включающем в себя центральный процессор, оперативную память, запоминающие устройства (жесткие диски, переносные магнитные и оптические носители информации, карты памяти, флеш-накопители и др.).

Устройства вывода данных – монитор, графопостроитель, плоттер, принтер, с помощью которых обеспечивается наглядное представление результатов обработки пространственно-временных данных.

Программные средства – программное обеспечение (ПО) для реализации функциональных возможностей ГИС. Оно подразделяется на базовое и прикладное ПО.

Базовые программные средства включают: операционные системы (ОС), программные среды, сетевое программное обеспечение, системы управления базами данных, а также модули управления средствами вво-

да и вывода данных, систему визуализации данных и модули для выполнения пространственного анализа.

К прикладному ПО относятся программные средства, предназначенные для решения специализированных задач в конкретной предметной области. Они реализуются в виде отдельных модулей (приложений) и утилит (вспомогательных средств).

Информационное обеспечение – совокупность массивов информации, систем кодирования и классификации информации. Особенность хранения пространственных данных в ГИС – их разделение на слои. Многослойная организация электронной карты, при наличии гибкого механизма управления слоями, позволяет объединить и отобразить гораздо большее количество информации, чем на обычной карте.

18.4. Глобальные навигационные спутниковые системы

В настоящее время для определения положения точек или объектов в пространстве широко применяются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС): американская **NAVSTAR GPS** (Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System) и российская **ГЛОНАСС** (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система). Их глобальность обеспечивается функционированием на околоземных орбитах искусственных спутников (ИСЗ), видимых из любой точки Земли. Данные спутники непрерывно передают высокоточные измерительные сигналы и создают, таким образом, вокруг нашей планеты **информационное координатно-временное поле**. Используя данное поле, с помощью специального приемника и программного обеспечения можно определять положение точек и объектов в пространстве и времени.

18.5. Принцип действия ГНСС

Принцип, на котором основано действие ГНСС, весьма прост – местоположение объекта определяется путем измерения расстояний от него до исходных точек, координаты которых известны. Сложность его реализации с помощью ГНСС обусловлена стремлением сделать систему глобальной, т. е. доступной в любое время на всей Земле и в окружающем пространстве. Для этого в качестве исходных точек выбраны искусственные спутники Земли, излучающие дальномерные радиосигналы, которые пользователь принимает на специальный приемник. Так как спутники движутся по своим орбитам, система предоставляет пользователю информацию о координатах ИСЗ на любой момент выполнения измерений.

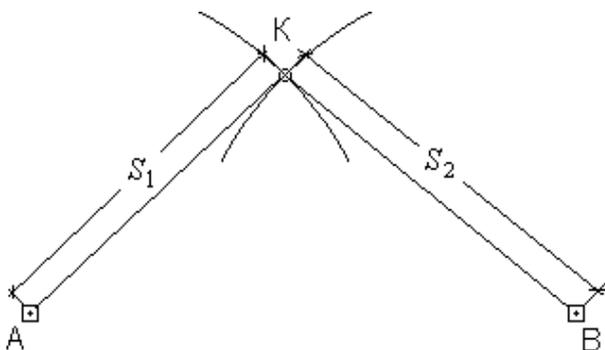


Рис. 102. Линейная засечка

Применяемый в ГНСС метод определения местоположения чек основан на линейной геодезической засечке. Ее суть сводится к известной геометрической задаче: найти на плоскости положение точки К, если известны положения двух других точек А и В и расстояния от них до точки К соответственно S_1 и S_2 (рис. 102).

Искомая точка К принадлежит одновременно двум окружностям с радиусами S_1 и S_2 , описанным из центров А и В, т. е. является одной из двух точек пересечения этих окружностей. В аналитическом представлении эта задача выражается в виде системы двух уравнений

$$\begin{cases} S_1 = \sqrt{(X_A - X_K)^2 + (Y_A - Y_K)^2} \\ S_2 = \sqrt{(X_B - X_K)^2 + (Y_B - Y_K)^2} \end{cases}$$

где X_A, Y_A, X_B, Y_B и X_K, Y_K – прямоугольные координаты точек на плоскости.

Таким образом, искомые координаты X_K, Y_K точки К получаются из решения системы двух уравнений с двумя неизвестными.

При обобщении этой задачи от плоского построения к пространственному вводится третья координата Z , и для определения теперь уже трех искомых координат X_K, Y_K, Z_K точки К необходимо решить систему из трех уравнений

$$\begin{cases} S_1 = \sqrt{(X_1 - X_K)^2 + (Y_1 - Y_K)^2 + (Z_1 - Z_K)^2} \\ S_2 = \sqrt{(X_2 - X_K)^2 + (Y_2 - Y_K)^2 + (Z_2 - Z_K)^2} \\ S_3 = \sqrt{(X_3 - X_K)^2 + (Y_3 - Y_K)^2 + (Z_3 - Z_K)^2} \end{cases}$$

Следовательно, при решении пространственной линейной засечки должно быть три исходных пункта, которые не должны лежать на одной прямой, иначе система уравнений не будет иметь определенного решения. Количество исходных точек, до которых измеряются расстояния, может быть и больше трех, тогда система уравнений становится переопределенной, и задача решается методом наименьших квадратов. Привлечение избыточных измерений, позволяет повысить точность определения координат и к тому же дает еще возможность включения в систему уравнений дополнительных неизвестных параметров, определение которых необходимо для корректной работы с ГНСС.

С помощью описанного метода линейной геодезической засечки в ГНСС решаются две главные задачи (рис. 103):

– определение координат спутника по измеренным до него расстояниям от наземных пунктов с известными координатами (прямая геодезическая засечка);

– определение координат наземного (или надземного) объекта по измеренным до него расстояниям от нескольких спутников, координаты которых известны (обратная геодезическая засечка).

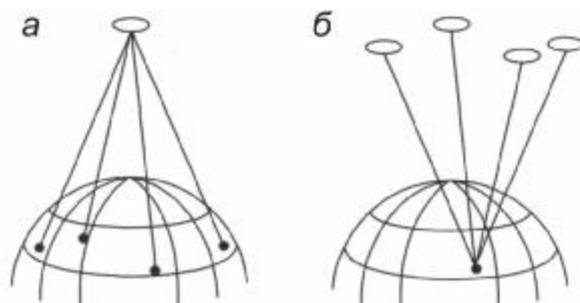


Рис. 103. Схемы определения координат спутника (а) и наземного пункта (б)

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что собой представляют геоинформационные системы (ГИС)?
2. Какие данные используются для создания ГИС?
3. Приведите классификацию геоинформационных систем?
4. Укажите основные компоненты геоинформационных систем?
5. Что собой представляют глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС)?
6. На чем основывается принцип действия ГНСС?
7. Какие главные задачи решаются в ГНСС?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сборнике лекций изложены основные сведения по геодезии и топографии, дано описание геодезических приборов их устройства, рассмотрены методы геодезических измерений, вычислений и оценки точности их результатов, инженерно-геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений, общие вопросы по геоинформационным и спутниковым навигационным системам.

Приведенный учебный материал является основой для успешного освоения студентом практической части дисциплины «Инженерная геодезия» и приобретения навыков, необходимых инженеру, как для разработки различных проектов, так и для строительства и изучения работы инженерных сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инженерная геодезия (с основами геоинформатики) : учеб. / С.И. Матвеев [и др.] ; под ред. С.И. Матвеева. – М. : ГОУ УМЦ ЖДТ, 2007. – 555 с.
2. Инженерная геодезия : учеб. для вузов ; под ред. Д.Ш. Михелева. – 4-е изд., испр. – М. : Академия, 2004. – 480 с.
3. Куштин, И.Ф. Инженерная геодезия : учеб. / И.Ф. Куштин, В.И. Куштин. – Ростов-н/Д : Изд-во ФЕНИКС, 2002. – 416 с.
4. Инженерная геодезия : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Г.С. Бронштейн, В.Д. Власов, Н.С. Зайцев [и др.] ; под ред. С.И. Матвеева. – М; 1999. – 455 с.
5. Инженерная геодезия : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / А.А. Визгин, В.Н. Ганьшин, В.А. Каугия [и др.] ; под ред. проф. Л.С. Хренова. – г-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. лек., 1985. – 352 с.

6. Строительно-технические нормы Министерства путей сообщения Российской Федерации. Железные дороги колеи 1520 мм (СТН Ц-01-95).
7. Строительные нормы и правила Российской Федерации. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения (СНиП 11-02-96). – М., 1996.
8. Свод правил по инженерно-геодезическим изысканиям для строительства (СП 11-104-97). – М., 1997.
9. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500.-М.: Недра, 1989. – 286 с.
10. Инструкция по нивелированию 1–4-х классов. – М. : Недра, 1990. – 167 с.
11. Ганьшин В.Н. Таблицы для разбивки круговых и переходных кривых / В.Н. Ганьшин, Л.С. Хренов. – М. : Недра, 1985.
12. Справочное руководство по инженерно – геодезическим работам / под ред. В.Д. Большакова и Г.П. Левчука. – М. : Недра, 1980. – 781 с.
13. Основы геоинформатики : учеб. пособие для студ. вузов в 2-х книгах / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов [и др.] ; под ред. В.С. Тикунова. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 480 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Лекция 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОДЕЗИИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	4
1.1. Предмет геодезии и её связь с другими науками	4
1.2. Краткий исторический очерк развития российской геодезии	8
1.3. Задачи инженерной геодезии	9
1.4. Понятие о форме и размерах Земли	10
1.4.1. Общие положения	10
1.4.2. Математическая поверхность Земли	11
1.4.3. Физическая поверхность Земли	13

1.5. Проектирование земной поверхности. Системы координат	14
1.5.1. Общие положения	14
1.5.2. Геодезические координаты	15
1.5.3. Астрономические координаты (для геодезии)	16
1.5.4. Географические координаты	16
1.5.5. Плоские прямоугольные геодезические координаты (зональные)	17
1.5.6. Полярные координаты	20
1.5.7. Системы высот	20
Лекция 2. ОРИЕНТИРОВАНИЕ НА МЕСТНОСТИ	22
2.1. Понятие об ориентировании	22
2.2. Дирекционные углы и осевые румбы, истинные и магнитные азимуты, зависимость между ними	22
2.2.1. Дирекционные углы и осевые румбы	22
2.2.2. Истинные азимуты и румбы	25
2.2.3. Магнитные азимуты и румбы	27
2.3. Прямая и обратная геодезическая задача	28
2.3.1. Прямая геодезическая задача	28
2.3.2. Обратная геодезическая задача	29
2.4. Связь между дирекционными углами предыдущей и последующей линии	30
Лекция 3. ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СЪЕМКА. РЕЛЬЕФ, ЕГО ИЗОБРАЖЕНИЕ НА КАРТАХ И ПЛАНАХ. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ	32
3.1. Геодезическая съемка. План, карта, профиль	32
3.2. Рельеф. Основные формы рельефа	34
3.3. Изображение рельефа на планах и картах	35
3.4. Цифровые модели местности	39
3.5. Задачи, решаемые на планах и картах	42
3.5.1. Определение отметок точек местности по горизонталям	42
3.5.2. Определение крутизны ската	42
3.5.3. Построение линии с заданным уклоном	45
3.5.4. Построение профиля по топографической карте	45

Лекция 4. ИЗМЕРЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УГЛОВ.	
ТЕОДОЛИТЫ	47
4.1. Принцип измерения горизонтального угла	47
4.2. Теодолит, его составные части	48
4.3. Классификация теодолитов	50
4.4. Основные узлы теодолита	51
4.4.1. Отсчетные приспособления	51
4.4.2. Уровни	52
4.4.3. Зрительные трубы	53
4.5. Предельное расстояние от теодолита до предмета	56
Лекция 5. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН ЛИНИЙ	57
5.1. Виды измерений линий	57
5.2. Приборы непосредственного измерения линий	57
5.3. Компарирование мерных лент и рулеток	59
5.4. Вешение линий	60
5.5. Порядок измерения линий штриховой лентой	61
5.6. Вычисление горизонтальной проекции наклонной линии местности	63
5.7. Косвенные измерения длин линий	63
5.8. Параллактический способ измерения расстояний	65
Лекция 6. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИН ЛИНИЙ ДАЛЬНОМЕРАМИ	65
6.1. Физико-оптические мерные приборы	66
6.2. Нитяный оптический дальномер	66
6.3. Определение горизонтальных проложений линий измеренных дальномером	68
6.4. Определение коэффициента дальномера К	69
6.5. Принцип измерения расстояний электромагнитными дальномерами	69
6.6. Способы съемки ситуации	71
Лекция 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕВЫШЕНИЙ И ОТМЕТОК ТОЧЕК	73
7.1. Задачи и виды нивелирования	73
7.2. Способы геометрического нивелирования	74
7.3. Классификация нивелиров	76
7.4. Нивелирные рейки	77
7.5. Влияние кривизны Земли и рефракции на результаты нивелирования	78

Лекция 8. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ	80
8.1. Принцип организации съёмочных работ.....	81
8.2. Назначение и виды государственных геодезических сетей.....	81
8.3. Плановые государственные геодезические сети. Методы их создания.....	82
8.4. Высотные государственные геодезические сети.....	83
8.5. Геодезические съёмочные сети	84
8.6. Плановая привязка вершин теодолитного хода к пунктам ГГС	85
Лекция 9. ТАХЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА	89
9.1. Тригонометрическое нивелирование.....	89
9.2. Определение превышения тригонометрическим нивелированием с учетом поправки за кривизну Земли и рефракции.....	90
9.3. Тахеометрическая съёмка, её назначение и приборы	90
9.4. Производство тахеометрической съёмки	92
9.5. Электронные тахеометры	93
Лекция 10. ТЕОРИЯ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ	96
10.1. Общие понятия об измерениях.....	96
10.2. Ошибки измерений	97
10.3. Свойства случайных ошибок измерений	97
10.4. Оценка точности результатов измерений	98
10.5. Средняя квадратическая ошибка функции общего вида	99
10.6. Математическая обработка результатов равноточных измерений	100
10.7. Неравноточные измерения. Понятие о весе измерения. Формула общей арифметической середины или весового среднего	102
Лекция 11. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ. РАЗБИВКА ТРАССЫ	105
11.1. Понятие о трассировании линейных сооружений.....	106
11.2. Укладка трассы на местности.....	107
11.3. Контроль угловых измерений на трассе	108
11.4. Разбивка пикетажа, поперечников, съёмка полосы местности	109
11.5. Пикетажный журнал.....	110
Лекция 12. ДОРОЖНЫЕ ЗАКРУГЛЕНИЯ	112

12.1. Круговые кривые	112
12.2. Вычисление пикетажа главных точек круговой кривой	114
12.3. Разбивка кривой в главных точках на местности.....	115
12.4. Детальная разбивка круговой кривой.....	115
12.5. Вынос пикетов на кривую	119
Лекция 13. ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ КРИВЫЕ	120
13.1. Переходная кривая	120
13.2. Железнодорожная кривая, её элементы и главные точки.....	122
13.3. Вычисление пикетажа главных точек железнодорожной кривой и разбивка кривой в главных точках на местности	123
Лекция 14. НИВЕЛИРОВАНИЕ ТРАССЫ	124
14.1. Закрепление трассы по высоте	124
14.2. Задача нивелирования.....	124
14.3. Работа с нивелиром на станции.....	125
14.4. Нивелирование оврагов	126
14.5. Нивелирование поперечников	127
14.6. Нивелирование через реку	128
14.7. Контроль нивелирования трассы	129
Лекция 15. МЕНЗУЛЬНАЯ СЪЕМКА.....	130
15.1. Понятие мензуральной съемки.....	130
15.2. Комплект мензулы	131
15.3. Съёмочное обоснование мензуральной съемки.....	133
15.4. Съёмка ситуации и рельефа местности	133
Лекция 16. ФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ	134
16.1. Фотограмметрия и её назначение	134
16.2. Аэрофотосъемка.....	135
16.3. Аэрофотосъёмочная аппаратура	136
16.4. Аэрофотоснимок и карта. Их отличие и сходство.....	138
Лекция 17. ФОТОТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)	139
17.1. Летносъёмочные работы	139
17.2. Масштаб аэрофотоснимка	140
17.3. Смещение точки на снимке за счет рельефа.....	141
17.4. Трансформирование аэрофотоснимков	142

17.5. Сгущение планово-высотного обоснования аэросъемки.....	143
17.6. Дешифрирование аэрофотоснимков	143
17.7. Создание топографических карт по аэрофотоснимкам	144
Лекция 18. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ	
НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ	146
18.1. Понятие о геоинформационных системах.....	146
18.2. Классификация геоинформационных систем	147
18.3. Основные компоненты геоинформационных систем	148
18.4. Глобальные навигационные спутниковые системы	149
18.5. Принцип действия ГНСС	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	152

Учебное издание

Анисимов Владимир Александрович
Макарова Светлана Васильевна

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДЕЗИЯ

Сборник лекций

Редактор *Г.Ф. Иванова*
Технический редактор *И.А. Нильмаер*

План 2009 г. Поз. 4.27. Подписано в печать 16.12.2009.
Формат 60×84¹/₁₆. Гарнитура Arial. Усл. печ. л. 8,8.
Зак. 321. Тираж 325 экз. Цена 88 р.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.