

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НЕФТИ И ГАЗА имени И.М. ГУБКИНА**



А.Г. Парамонов

ГЕОДЕЗИЯ
Учебное пособие

РГУ НЕФТИ
И ГАЗА
ИМЕНИ И.М. Губкина

Москва
2008

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НЕФТИ И ГАЗА имени И.М. ГУБКИНА

Кафедра геологии

А.Г. Парамонов

ГЕОДЕЗИЯ

Учебное пособие

Москва 2008

Издание подготовлено на кафедре геологии.

Настоящее учебное пособие написано в соответствии с курсом «Геодезия» для студентов специальностей 130201, 130202 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых», «Геофизические методы исследований скважин».

Издание пособия вызвано отсутствием в настоящее время учебника по данному курсу.

Работа включает в себя следующие темы:

- Предмет и задачи геодезии.
- Понятие о фигуре Земли.
- Изображение поверхности эллипсоида на плоскости.
- Топографические планы и карты.
- Картографические проекции.
- Задачи, решаемые по топографической карте.
- Ориентирование линий.
- Геодезические измерения.
- Топографические съемки.
- Сведения из теории погрешностей измерений.

Большинство излагаемых в учебной работе тем являются базовыми при изучении всех геодезических курсов («Основы топографии», «Инженерная геодезия»). Поэтому пособие может быть полезно также студентам специальностей: 130304 «Геология нефти и газа», 130601 «Морские нефтегазовые сооружения», 130501 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ».

Рецензенты – профессор кафедры инженерной геодезии МГСУ Седельникова И.А.; доцент МИИГАИК, к.т.н. Барков Д.П.

© Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина,

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кулешов Д.А., Стрельников Г.Е., Рязанцев Г.Е. Инженерная геодезия – М. Картогеоцентр – Геодезиздат, 1996 г.
2. Парамонов А.Г., Черноглазов Н.В., Сомов В.Д. Основы топографии и аэрофотосъемки. – М., Недра, 1991 г.
3. Глинский С.П., Гречанинова Г.И., Данилевич В.М. и др. Геодезия. – М.: Геодезиздат, 1995 г.
4. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500.-М.; Недра, 2000 г.
5. Федотов Г.А. Инженерная геодезия – М. «Высшая школа», 2004г.
6. Аковецкий В.Г., Парамонов А.Г. «Топогеодезическое обеспечение месторождений нефти и газа». Учебное пособие в 2-х книгах. РГУ нефти и газа им.И.М.Губкина. 2006 г.
7. Дементьев В.Е. «Современная геодезическая техника и ее применение». Тверь ООО ИПП «АЛЕН», 2006 г.

Глава 1

Общие сведения

	стр
§ 1. Предмет и задачи геодезии.....	7
§ 2. О значении инженерной геодезии и топографии при поисках, разведке и разработке полезных ископаемых.....	10
§ 3. Понятие о фигуре Земли.....	11
§ 4. Понятие о методах определения формы и размеров Земли.....	12
§ 5. Уровненные поверхности. Геоид.....	16
§ 6. Геодезические системы отсчета.....	17
§ 7. Системы координат.....	18
§ 8. О высоте точек.....	19
§ 9. Изображение поверхности эллипсоида на плоскости.....	21

Глава 2

Карты и планы

§ 10. Понятие о карте и плане.....	23
§ 11. Масштаб. Точность масштаба.....	23
§ 12. Понятие о картографических проекциях.....	24
§ 13. Карты общегеографические и топографические.....	30
§ 14. О картографической генерализации.....	33
§ 15. Зональная проекция Гаусса – Крюгера.....	36
§ 16. Условные знаки топографических карт.....	38
§ 17. Изображение рельефа на топографических картах.....	39
§ 18. Топографические карты шельфа.....	45

Глава 3

Задачи, решаемые по топографической карте

§ 19. Общая характеристика задач.....	47
§ 20. Определение по карте географических и прямоугольных координат.....	48
§ 21. Определение по карте расстояний.....	51
§ 22. Ориентирование.....	55
§ 23. Определение площадей участков местности по топографической карте.....	59
§ 24. Определение по топографической карте высот точек, крутизны скатов, построение профиля по заданному направлению, линии заданного уклона.....	64
§ 25. Ориентирование на местности с помощью карты и компаса.....	68

Глава 4

Геодезические измерения

§ 26. Единицы измерений.....	70
§ 27. Измерение и построение углов.....	72
§ 28. Приборы для угловых измерений.....	81
§ 29. Линейные измерения.....	82
§ 30. Нивелирование.....	91
§ 31. Геометрическое нивелирование.....	92
§ 32. Нивелиры.....	95
§ 33. Тригонометрическое нивелирование.....	102
§ 34. Барометрическое нивелирование.....	104
§ 35. Аэорадионивелирование.....	106

Глава 5

Геодезические сети

§ 36. Понятие о государственной геодезической сети.....	107
§ 37. Плановая государственная геодезическая сеть.....	107
§ 38. Высотная (нивелирная) государственная геодезическая сеть.....	111
§ 39. Геодезические сети сгущения.....	114
§ 40. Построение теодолитных ходов.....	114
§ 41. Прямая геодезическая задача.....	118
§ 42. Обратная геодезическая задача.....	118
§ 43. Уравнивание приращений координат замкнутого и разомкнутого теодолитного хода.....	119
§ 44. Спутниковые системы определения местоположения объектов.....	121

Глава 6

Топографические съемки

§ 45. Теодолитная съемка.....	125
§ 46. Тахеометрическая съемка.....	125
§ 47. Электронные тахеометры.....	129
§ 48. Лазерное сканирование.....	131
§ 49. Топографическая съемка акваторий.....	132
§ 50. Элементы аэрофототопографической съемки.....	141
§ 51. Внешнее и внутреннее ориентирование снимка.....	150
§ 52. Стереоскопическая модель местности.....	150
§ 53. Топографическое дешифрирование аэро и космических снимков.....	155
§ 54. Особенности космических снимков, их топографического и геологического дешифрирования.....	159
§ 55. Понятие об инклинометрии.....	164

Глава 7

Сведения из теории погрешностей и измерений

§ 56. Оценка точности результатов измерений.....	168
§ 57. Средняя квадратическая погрешность функции измеренных величин.....	173
§ 58. Средняя квадратическая погрешность арифметического среднего.....	174
§ 59. Оценка точности по разностям двойных измерений.....	176
§ 60. Неравноточные измерения. Понятие о весе.....	177

Глава 1 Общие сведения

§ 1. Предметы и задачи геодезии.

Геодезия – наука, изучающая фигуру и гравитационное поле Земли, планет Солнечной системы, методы и способы определения положения точек в принятой системе координат и занимающаяся точными измерениями на местности, необходимыми для создания карт и планов земной поверхности, решения разнообразных производственно – технических задач народного хозяйства и обороны страны.

Научные и практические задачи геодезии решаются на основе геодезических измерений при помощи геодезических приборов.

В геодезии выделяют следующие разделы:

- высшая геодезия;
- топография;
- инженерная геодезия.

Высшая геодезия – наука, которая занимается изучением формы Земли и ее внешнего гравитационного поля, определением координат отдельных точек земной поверхности в единой системе, а так же изучает горизонтальные и вертикальные движения земной коры. Эта область геодезии занимается также изучением фигур планет Солнечной системы и их гравитационных полей.

В высшей геодезии для изучения фигуры Земли и ее внешнего гравитационного поля разрабатываются теория и методы:

- высокоточных измерений на земной поверхности расстояний и высот, горизонтальных и вертикальных углов между направлениями на земной поверхности;
- измерения силы тяжести;
- наблюдения искусственных спутников Земли с целью определения их положения в околоземном пространстве;
- определения географических широт, долгот и направлений меридианов в результате наблюдения спутников и астрономических светил;
- получения количественных характеристик вертикальных и горизонтальных тектонических движений земной коры.

Точки на поверхности Земли, координаты которых определены методами высшей геодезии, образуют государственную геодезическую сеть. Государственная геодезическая сеть является основой для съемочной сети, создаваемой при топографической съемке.

Топография (от греч. место и пишу) – научная дисциплина, изучающая земную поверхность, т.е. элементы физической поверхности суши и расположенные на ней объекты деятельности человека в геометрическом отношении, а также способы ее изображения.

В задачи топографии входит:

- организация измерений на местности, обработка их результатов с целью создания топографических карт (масштабы 1:100 000 и крупнее) и географическое изучение снимаемой местности;
- создание на местности съемочной сети, состоящей из пунктов, положение которых определено в единой системе координат;
- организация и выполнение съемочных работ наземными методами;
- организация и разработка методов выполнения съемочных работ с использованием материалов наземной и воздушной стереофотосъемок.

Основным видом съемки для составления топографических карт в настоящее время является аэрофототопографическая съемка – фотографирование местности с воздуха с последующей обработкой фотографических снимков.

Инженерная геодезия изучает методы геодезических работ, выполняемых при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации разнообразных инженерных сооружений; при разведке, разработке и эксплуатации природных богатств страны и ее недр.

В инженерной геодезии используют методы высшей геодезии, топографии, фотограмметрии.

Топография и аэротопография занимаются разработкой методов создания планов и карт по фотоснимкам и аэроснимкам местности.

Область науки, техники и производства, охватывающая изучение, создание и использование карт называется *картографией*.

Задачи инженерной геодезии и топографии решаются при помощи специальных измерений. Измерения следует выполнять с необходимой, обоснованной точностью. Измерения, выполненные с завышенной точностью, приводят к излишним затратам сил, средств, времени, а с недостаточной точностью – к ошибкам и браку в работе. Поэтому перед проведением измерений проводится инженерный расчет с целью выбора методики получения результатов с заданной точностью.

Геодезия возникла в глубокой древности, когда для развития человеческого общества появилась необходимость в измерении площадей обрабатываемых полей, в изучении земной поверхности для хозяйственных целей. В Древнем Египте еще в 18 в. до н.э. существовало руководство по решению арифметических и геометрических задач, возникающих при измерении и определении площадей земельных участков. Есть сведения, что в Китае около 10 в. до н.э. существовало учреждение для топографических съемок страны. В Вавилоне и Ассирии (7 в. до н.э.) общегеографические и специальные карты составлялись на глиняных дощечках. Строительство каналов и оросительных систем невозможно было выполнить без геодезических измерений и съемок местности, выполняемых с достаточно высокой точностью.

После того, как Пифагором (580-500 гг. до н.э.) и Аристотелем (384-322 гг. до н.э.) были высказаны предположения о шарообразности Земли, Эратосфеном (276-195 гг. до н.э.) были сделаны определения радиуса Земли. Эти определения были основаны на геометрическом методе, который получил название градусных измерений. Во 2 в. до н.э. астрономы и математики установили понятия географической широты и долготы места, разработали первые картографические проекции с сеткой меридианов и параллелей на картах, дали методы определения положения точек земной поверхности из астрономических наблюдений.

Первые сведения о выполнении геодезических измерений в России относятся к 1068 г., когда по приказанию князя Глеба между городами Керчью и Таманью по льду была измерена ширина Керченского пролива. В сборнике законов Древней Руси «Русская Правда», относящемся к 11-12 вв., содержатся постановления о земельных границах, которые устанавливались измерениями на местности. В период царствования Ивана Грозного (1530-1584) «служилые люди» были обязаны производить съемку и составлять описание тех мест, куда они направлялись. По этим материалам была составлена карта Московского государства в масштабе 1:1 800 000, известная под названием Большой чертеж.

Развитие геодезии и геодезических работ в России усилилось при Петре I. В 1701 г. он основал в Москве одну из первых в России астрономических обсерваторий и Школу математических и навигационных наук, готовившую астрономов, геодезистов, географов, гидрографов и навигаторов. В 1701 году С.У. Ремизовым и его сыновьями составлена «Чертежная книга Сибири», представлявшая собой первый русский географический атлас (23 карты). В 1745 г. Академией наук издается Атлас Российский. В 1797 г. при Генеральном штабе армии было организовано депо карт. В 1822 г. создан Корпус военных топографов. Все основные астрономо-геодезические и топографические работы на территории России в 19 и начале 20 вв. выполнялись специалистами этого учреждения. В результате работ Корпуса военных топографов были созданы топографические карты пограничных районов России в масштабе 1 и 2 версты в дюйме, 3-верстная карта Западной Сибири, 10-верстная карта Европейской части России и Западной России.

В Советский период геодезисты выполнили огромный объем работ, отвечающих потребностям социалистического строительства. Советским ученым М.С. Молодецким разработана новая теория изучения фигуры Земли и ее внешнего гравитационного поля, поставившая советскую геодезию в отношении решения ее основной проблемы на первое место в мире. Советскими геодезистами под руководством Ф.Н. Красовского получены новые параметры фигуры Земли. В своем развитии геодезические науки опираются на достижения других научных дисциплин, в первую очередь физики, высшей математики, электротехники. Новая эра в развитии геодезии открылась с запуском в СССР первого в мире искусственного спутника Земли. Спутниковые системы определения местоположения различных объектов, съемка поверхности Земли из космоса, широкое применение радиоэлектронных, лазерных и оптических электронных систем и приборов позволяют по-новому оперативно и с высокой точностью выполнять геодезические измерения, топографические и специальные съемки.

§ 2. О значении геодезии и топографии при поисках, разведке и разработке полезных ископаемых.

Геодезия и топография играют особую роль при решении различных задач в народном хозяйстве, например, при изыскании, проектировании и строительстве крупных гидротехнических сооружений, промышленных комплексов, железных и автомобильных дорог, аэродромов, городов и населенных пунктов, наземных и подземных коммуникаций, трубопроводов, при освоении месторождений различных природных ископаемых.

Топографо-геодезические работы являются составной частью работ по поиску, разведке и освоению месторождений нефти и газа. В последнее время возрастает объем геолого-геодезических исследований по освоению морских месторождений нефти и газа. Планирование и осуществление этих работ невозможно без использования геодезических методов и современных автоматизированных навигационных и геодезических систем, позволяющих с необходимой точностью оперативно определять положение исследовательских судов и самолетов, находящихся на большом удалении от берега.

В ходе эксплуатации нефтяных и газовых месторождений происходят деформации земной поверхности на территории этих месторождений. Данные, позволяющие наблюдать динамику этого процесса, получают из повторных геодезических наблюдений сети специальных точек.

Топографические карты – подробные, единые по содержанию, оформлению и математической основе; географические карты, отображающие основные природные и социально-экономические объекты (рельеф, растительность, населенные пункты, дороги, хозяйственные объекты и т.п.), создаются на единой геодезической основе. Значение топографических карт трудно переоценить – они дают возможность изучать местность без ее непосредственного наблюдения и являются той основой, на которой отображаются результаты исследований в геологии, геофизике, геоморфологии и других науках, изучающих Землю. На основе топографических карт составляют географические, геологические и другие специальные карты. Топографические карты используются при государственном планировании, для проектирования инженерных сооружений, при разведке природных богатств, организации эксплуатации месторождений нефти, газа и полезных ископаемых.

Топографические карты разных лет, дополненные материалами дистанционных съемок в разных зонах спектра электромагнитных колебаний, используются при изучении процессов, происходящих в природе под воздействием хозяйственной деятельности человека, для решения вопросов экологии.

При поисках и разведке месторождений нефти и газа топографические карты используются для предварительного изучения территории с целью планирования геологических и геофизических исследований. В ходе проведения поисковых и разведочных геологических и геофизических работ топографические карты необходимы для ориентирования на местности и для привязки точек геологических исследований. По топографической карте проектируют геофизические маршруты (профили), а затем с помощью геодезических методов

положение этих маршрутов обозначают на местности.

В ходе разработки нефтяного или газового месторождения геодезическими методами определяют положение всех скважин, наземных и подземных сооружений, трубопроводов, линий электропередач и связи. Затем эти объекты наносят на карту или план месторождения.

В процессе аэрофотографической съемки получают аэрофотоснимки земной поверхности с высоким качеством изображения. Эти снимки можно использовать не только в целях составления топографических карт, но и для геологического изучения территории.

Характеристику аэрофотосъемке, как методу изучения природных ресурсов, приводил академик А.Е. Ферсман в 1928 г. Аэрофотосъемка дает точный и объективный фотографический снимок территории, она позволяет повторить съемки в разные периоды и установить изменения, которые вносят природа и хозяйственная деятельность человека в течение определенного промежутка времени.

Космические изображения дают большой объем информации по структурному строению территорий. По ним можно выделить складчатые структуры и разломы разных порядков: от глобальных и региональных, не прослеживающихся по аэрофотоснимкам, до локальных, с размерами в несколько километров.

Выдающийся советский ученый-геолог академик И.М. Губкин, отмечая важность топографических работ, писал о том, что топографические карты и планы служат необходимым условием для последующего успешного осуществления работ геолога, разведчика, гидролога, гидротехника, географа, почвовед, лесоведа, инженера-проектировщика, строителя и т.д.

§ 3. Понятие о фигуре Земли.

Первое в истории науки определение размеров Земли, как шара, было проведено в Древнем Египте Эратосфеном. Во второй половине 17 в. была открыта центробежная сила и обнаружена зависимость периода колебаний физического маятника от его длины и ускорения силы тяжести. Были установлены факты изменения длины секундного маятника с изменением широты места. Обобщение этих сведений и открытие закона всемирного тяготения привели к предположению о сплюснутости Земли в направлении полюсов.

Для проверки этого предположения Парижской академией наук были организованы экспедиции в Перу и Лапландию (1735-1742 гг.) для выполнения градусных измерений. Результаты этих измерений подтвердили сплюснутость Земли в направлении полюсов и дали еще одно доказательство справедливости закона всемирного тяготения.

К середине 18 в. французский математик Клеро ввел дифференциальное уравнение 2-го порядка, связывающее плотность и сжатие внутренних сферических слоев Земли. Дифференциальное уравнение Клеро, впоследствии надлежащим образом уточненное, служит и теперь для определения сжатия Земли на основании предположения о ее внутреннем строении. Таким образом, был открыт закон распределения силы тяжести на поверхности земного эллипсоида и установлена связь между сжатием земного эллипсоида и распределением

силы тяжести на его поверхности.

В 1785 г. во Франции А.М. Лежандр ввел понятие о потенциальной функции, положившее начало развитию теории потенциала и имеющее большое значение для геодезии при изучении фигуры Земли.

В 1792-1799-х годах П. Мешен и Ж. Деламбр (Франция) измерили дугу меридиана от Дюнкерка до Барселоны для установления длины метра как $1/10\,000\,000$ доли четверти земного меридиана. По результатам этих измерений впервые достаточно точно были определены размеры земного эллипсоида.

В 1816 г. началось и в 1855 г. закончилось градусное измерение в России. Возглавлял работы известный астроном В.Я. Струве. Протяженность измеренной дуги меридиана от устьев Дуная до берегов Ледовитого океана составила 25° по широте.

Помимо дуги Струве на территории России в 1848-1858 гг. были проведены градусные измерения по параллели 48° от Кишинева до Астрахани протяженностью около 20° , а в 1861-1870 гг. по параллели 52° от западных границ до Орска протяженностью по долготе около 39° . По данным этих градусных измерений в 1893 г. А.М. Жданов произвел одно из известных определений размеров земного эллипсоида. Ранее ученые разных стран, такие как Бессель, Кларк, Хейфорд, определяли параметры земного эллипсоида.

В 1828 г. Гаусс предложил принять за математическую поверхность Земли уровенную поверхность потенциала силы тяжести, совпадающую со средним уровнем моря. Обнаружившиеся в ходе определений параметров земного эллипсоида расхождения результатов, полученных разными авторами, показали, что фигура Земли имеет сложный вид и не может быть точно представлена какой-нибудь геометрической фигурой. В 1873 г. немецким физиком Листингом для характеристики фигуры Земли было предложено понятие геоид.

§ 4. Понятие о методах определения формы и размеров Земли.

Если принять фигуру Земли за шар, то размеры шара, его радиус можно определить путем измерения длины дуги S (рис.1) на поверхность Земли. Если известен центральный угол $\Delta\varphi$, то можно определить длину окружности, а затем найти радиус. Угол $\Delta\varphi$ можно получить как разность широты двух точек – точки 2 и 1, а широту φ_2 и φ_1 определить из астрономических наблюдений, тогда

$$R = \frac{360^\circ S}{2\pi \Delta\varphi},$$

где φ в градусах.

Примерно так и определяли размеры Земли в древности. Для многих практических расчетов Землю можно принять за шар, радиус которого 6371 км.

Для определения параметров эллипсоида – большой полуоси a и полярного сжатия α , связанных отношением:

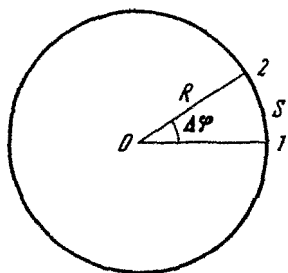


Рис. 1. К определению радиуса шара

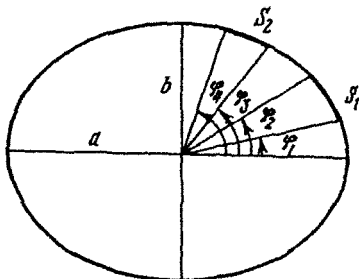


Рис. 2. К определению параметров эллипсоида

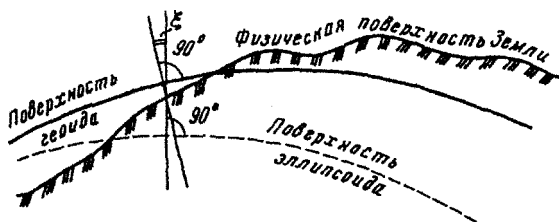


Рис. 3. Схема расположения эллипсоида, геоида и физической поверхности Земли

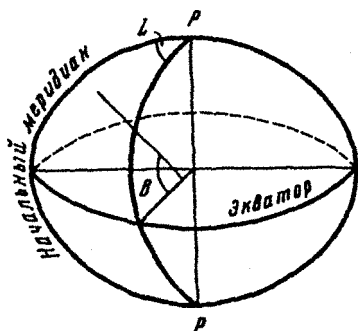


Рис. 4. Геодезическая система координат

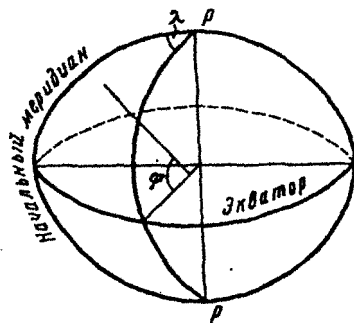


Рис. 5. Астрономическая система координат

$$\alpha = \frac{a-b}{a},$$

где b – малая полуось, необходимо измерить две дуги S_1 и S_2 (рис. 2).

В этом случае:

$$S_1 = a \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{\rho} \left\{ 1 - \left[\frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \right] e^2 - \dots \right\};$$

$$S_2 = a \frac{(\varphi_4 - \varphi_3)}{\rho} \left\{ 1 - \left[\frac{1}{4} + \frac{3}{4} \cos(\varphi_3 + \varphi_4) \right] e^2 - \dots \right\};$$
(1)

Где $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ – первый эксцентриситет; φ_1, φ_2 и φ_3, φ_4 – измеренные астрономические широты концов обеих дуг, угл. с.; ρ – в угл. с.

Из решения уравнений (1) находят неизвестные a и e^2 , а затем определяют α . На самом деле для определения параметров эллипсоида используют не две дуги, а гораздо больше, и для решения уравнений (1) применяют способ наименьших квадратов.

Сущность гравиметрического метода определения параметров эллипсоида. В этом методе определение формы Земли выполняется по результатам измерения силы тяжести. Вычисления ведут по формулам Клеро:

$$g_\varphi = g_0 + (g_{90} - g_0) \sin 2\varphi;$$

$$\frac{g_{90} - g_0}{g_0} = \frac{5}{2} q - \alpha,$$

где g_φ, g_0, g_{90} – ускорения силы тяжести на широте φ , на экваторе и полюсе; $q = \omega^2 d / g_0$ – отношение центробежной силы к ускорению силы тяжести на экваторе; α – сжатие эллипсоида.

Таким образом, по измерениям ускорения силы тяжести (гравиметрическим измерениям) можно тоже судить о размерах эллипсоида. С помощью гравиметрических измерений наиболее точно определяют значение сжатия, которое равно $\frac{1}{298,2}$.

Преимущество гравиметрических измерений в том, что их можно выполнять не только на суше, как градусные измерения, но и на море. Известно, что основную часть поверхности Земли занимают океаны, поэтому поверхность Мирового океана во многом определяет поверхность эллипсоида. Наиболее точные размеры земного эллипсоида получаются при совместной обработке данных градусных и гравиметрических определений.

Определить абсолютное значение ускорения силы тяжести до недавнего времени было довольно сложно, поэтому в одном из методов определяли только изменения ускорения силы тяжести на поверхности Земли относительно какого-то начального пункта, в котором выполнялись измерения и вычисления значения ускорения силы тяжести g_0 . Для определения значения g в других точках измеряют, например, период колебаний маятника S :

$$S = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ откуда } g = \pi^2 \frac{l}{S^2}.$$

Чтобы вычислить значение g , надо точно измерить длину маятника l , что довольно сложно (период колебания измеряется достаточно точно). Поэтому на исходном пункте также измеряют период колебаний S , тогда

$$g_0 = \pi^2 \frac{l}{S_0^2}.$$

Если на первом определяемом пункте период колебаний равен S_1 , то $g_1 = \pi^2 \frac{l}{S_1^2}$, на втором пункте $g_2 = \pi^2 \frac{l}{S_2^2}$. значения g_1 и g_2 можно найти из соотношений:

$$\frac{g_1}{g_0} = \frac{S_0^2}{S_1^2}; \quad \frac{g_2}{g_0} = \frac{S_0^2}{S_2^2};$$

(2)

$$g_1 = \frac{S_0^2}{S_1^2} g_0; \quad g_2 = \frac{S_0^2}{S_2^2} g_0.$$

Формулы (2) позволяют определять ускорение силы тяжести без знания длины маятника, таким образом исключаются ошибки за неточное определение длины маятника.

Понятие о решении некоторых геодезических задач из наблюдений ИСЗ. Со станций, координаты которых известны, определяют положение искусственного спутника Земли (ИСЗ), рассчитывают параметры его орбиты и прогнозируют положение спутника в пространстве на любой момент времени. Для определения местоположения точек с неизвестными координатами в этих точках наблюдают положение спутника с фиксацией момента наблюдения. По данным наблюдений вычисляют координаты определяемых точек.

Движение ИСЗ происходит в гравитационном поле Земли, поэтому изучение в координатной форме этого движения дает информацию о гравитационном поле Земли. Если бы Земля была шаром, то движение спутника совершалось бы по закону Кеплера, т.е. по плоской кривой — эллипсу, в одном из фокусов которого находится центр Земли. Однако вследствие эллипсоидальности Земли орбита спутника претерпевает возмущения — отклоняется от плоской кривой. Имеются математические зависимости между сжатием, с одной стороны, и характеристиками действительной орбиты спутника — с другой. Определяя эти характеристики из непосредственных наблюдений и используя указанные зависимости, можно вычислить сжатие Земли.

Для определения сжатия Земли из непосредственных наблюдений положения ИСЗ необходимо знать: скорость вращения орбиты, полуось и наклон ее к плоскости экватора. По

этим данным, а также по значениям большой полуоси земного эллипсоида и силе тяжести на экваторе, определяемым из геодезических и гравиметрических измерений и вычисляется сжатие Земли.

Выведенное из наблюдений искусственных спутников, сжатие характеризует эллипсоидальность Земли в целом, т.е. его можно рассматривать как сжатие общего земного эллипсоида, а не сжатие, наилучшим образом подходящее к какой-либо части поверхности земли, например, определяемое при градусных измерениях.

§ 5. Уровенные поверхности. Геоид.

Уровенная поверхность - поверхность, во всех точках которой потенциал силы тяжести имеет одинаковую величину. Направление нормали к уровенной поверхности совпадает с направлением силы тяжести, т.е. с отвесной линией. Таких поверхностей можно представить множество. *Геоидом* называется уровенная поверхность, совпадающая с поверхностью океанов и морей при спокойном состоянии водных масс и мысленно продолженная под материками.

Вследствие неравномерного распределения масс внутри Земли поверхность геоида является весьма сложной, и установить его форму и размеры не представляется возможным. Поскольку форму геоида во многом определяет вращение Земли с постоянной скоростью вокруг своей оси, при решении практических задач поверхность геоида заменяют поверхностью эллипсоида вращения.

Параметры общего земного эллипсоида, определенные под руководством советского ученого-геодезиста Феодосия Николаевича Красовского в 1940 г., следующие:

a – большая полуось, 6 378 245 м;

b – малая полуось, 6 356 863 м;

сжатие $\alpha = (a-b)/a = 1/298,3$.

При выводе параметров использовались материалы градусных измерений СССР, Западной Европы и США. Были использованы имевшиеся к тому времени материалы гравиметрической съемки. Сжатие, определяемое из спутниковых наблюдений, получается очень близкое по величине к тому, что получено Ф.Н. Красовским. В 1980 г. Международным астрономическим союзом были приняты новые значения эллипсоида: $a = 6\,378\,137$ м; $\alpha = 1/298,25\,722$.

Для того чтобы земной эллипсоид ближе подходил к геоиду, его надо соответственно расположить в теле Земли или, иначе говоря, ориентировать.

Эллипсоид вращения с определенными параметрами, ориентированный в теле Земли таким образом, чтобы отклонения его поверхности от геоида для данной территории были минимальными, называется референц – эллипсоидом. Постановлением Совета Министров СССР № 760 от 7 апреля 1946 г. эллипсоид Красовского принят в качестве референц – эллипсоида для геодезических и картографических работ в СССР. За исходный пункт был принят центр круглого зала Пулковской обсерватории с установленными широтой, долготой, азимутом.

Значения параметров эллипсоида, полученные другими авторами:

1841 г., Бессель (Германия): $a = 6\,377\,397$ м; $b = 6\,356\,079$ м; $\alpha = 1/299,2$;
 1880 г., Кларк (Великобритания): $a = 6\,378\,249$ м; $b = 6\,356\,515$ м; $\alpha = 1/293,5$;
 1909 г., Хейфорд (США): $a = 6\,378\,388$ м; $b = 6\,354\,912$ м; $\alpha = 1/297,0$.

На рис. 3 показано взаимное расположение эллипсоида, геоида и физической поверхности Земли. Угол ξ между нормалью к эллипсоиду и направлением силы тяжести называется *уклоном отвесной линии*. Для эллипсоида Красовского в среднем $\xi = 3 - 4''$, только в отдельных районах $\xi = 1'$. Отступления эллипсоида от геоида по высоте не превышают 100 – 150 м.

§ 6. Геодезические системы отсчета.

Системы отсчета бывают общеземные и референсные. Общеземные геодезические системы отсчета включают в себя параметры земного эллипсоида, гравитационного поля Земли и гринвичскую геоцентрическую прямоугольную систему координат.

Важнейшими параметрами Земли являются:

$f \cdot M_3$ – произведение гравитационной постоянной на массу; ω_3 – угловая скорость вращения; a – большая полуось (экваториальный радиус) и α – сжатие земного эллипсоида (сжатие $\alpha = (a-b)/a$, где b – малая полуось эллипсоида); C_0 – скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме.

В таблице 1 приведены физические параметры Земли ПЗ – 90.

Физические параметры Земли ПЗ -90 табл1

$f \cdot M_3$	$398600,44 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2$
ω_3	$7292115 \cdot 10^{-11}$ рад
C_0	299792458 м/с

Геометрические параметры эллипсоидов, используемых в настоящее время приведены в таблице 2.

Название эллипсоида	Полуось a , м	Сжатие α
СК – 42, СК – 95	6 378 245	1/298,3
ПЗ – 90	6 378 136	1/298,257839303
WGS - 84	6 378 137	1/298,257223563
GRS - 80	6 378 137	1/298,257222101

Постановлением Правительства РФ от 28 июля 2000 г для геодезических и картографических работ с 1 июля 2002 г устанавливается единая система координат СК – 95,

для обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач – геоцентрическая система координат ПЗ – 90. До завершения перехода используется СК – 42 (эллипсоид Красовского). Координатная система СК – 95 построена в результате совместной обработки 164 тысяч пунктов Астрономо – Геодезической сети, 134 пунктов доплеровской и 26 пунктов космической геодезических сетей. Она построена на эллипсоиде Красовского, оси которого в отличие от СК – 42, ориентированы параллельно соответствующим координатным осям ПЗ -90.

§ 7. Системы координат.

Геодезическая система координат

За основную поверхность, на которой определяется положение точек Земли, принимается поверхность референц – эллипсоида. Координатными плоскостями, относительно которых определяют координаты точек, являются плоскость экватора земного эллипсоида и плоскость начального меридиана (рис. 4).

Геодезическая широта B – угол, образованный нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке и плоскостью экватора. Счет широт идет от экватора от 0 до 90° , в северном полушарии – со знаком плюс, в южном – со знаком минус.

Геодезическая долгота L – двугранный угол между плоскостью начального (нулевого) меридиана и плоскостью меридиана данной точки.

Геодезической высотой точки H называется расстояние по нормали от поверхности эллипсоида до данной точки.

Астрономическая система координат

В отличие от геодезической системы координат в астрономической системе координаты определяют относительно отвесных линий в точках земной поверхности.

Астрономическая широта φ – угол, образованный отвесной линией в данной точке с плоскостью экватора (рис. 5).

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

В этой системе третьей координатой является *ортометрическая высота H_g* – высота точки над поверхностью геоида.

В мелкоммасштабном картографировании различие между астрономическими и геодезическими координатами обычно пренебрегают и употребляют широты и долготы, как координаты общей системы географических координат.

Система прямоугольных координат

В пространственной системе прямоугольных координат X, Y, Z с началом в центре земного эллипсоида ось Z располагается по полярной оси, оси X, Y – в плоскости экватора. Ось X располагается в сечении начального меридиана, ось Y перпендикулярна к ней. Система применяется для определения координат космических аппаратов в околоземном пространстве.

В системе плоских прямоугольных координат ось абсцисс X обычно совмещают с полуденной линией (меридианом) точки O , называемой началом координат. За положительное направление этой оси принимают направление на север. За положительное направление оси ординат Y принимают направление на восток. Четверти нумеруются по ходу часовой стрелки. Первая четверть северо – восточная. Иногда ось абсцисс X не совмещают с полуденной линией точки O , а дают этой линии другое, более удобное для проведения работ, направление. Такая система называется *условной системой координат*.

§ 8. О высоте точек.

Ранее были рассмотрены две системы высот: геодезическая высота и ортометрическая высота. Расхождение между этими высотами обусловлено отступлением эллипсоида от геоида.

Разности высот точек земной поверхности, получаемые из нивелирования, определяют разность потенциалов силы тяжести между этими точками. Если известно значение потенциала в начальной точке W_0 , то по результатам нивелирования легко вычислить значение потенциалов силы тяжести в соответствующих точках Земли по формуле

$$W_B = W_0 - \int_0^B gdh,$$

где g – значение силы тяжести.

Знание высот необходимо для изображения рельефа земной поверхности, а также для перехода от величин, измеренных на этой поверхности (углы, линии), к величинам, им соответствующим на поверхности эллипсоида.

Из непосредственных измерений получают разности высот точек Земли. Для вычисления высот необходимо знать высоту точки, принимаемой за исходную. Считается, что высота исходной точки известна. В России в качестве начала счета высот принят нуль Кронштадтского футштока (Балтийская система высот).

Геодезическую высоту H можно рассматривать как сумму двух слагаемых: расстояния от референц – эллипсоида до поверхности геоида (или квазигеоида) и расстояния от этой поверхности до соответствующей точки поверхности Земли. Эти слагаемые располагаются по нормали к поверхности референц – эллипсоида. Из рис.6 геодезическая высота точки M будет равна

$$H_M = H_M^g + \xi_M^g; \quad (3)$$

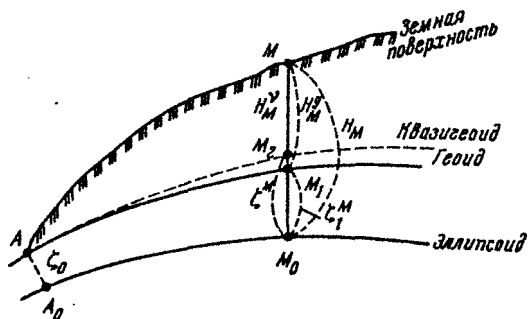


Рис. 6. Геодезическая, нормальная и ортометрическая высоты

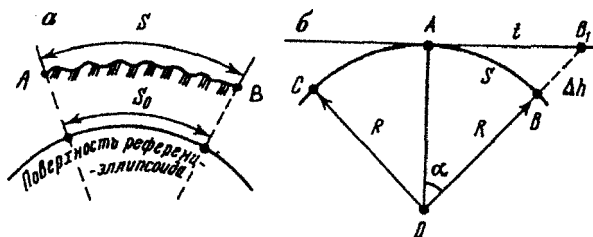


Рис. 7. К учету формы Земли при измерении расстояний и высот:
 а — схема редуцирования расстояний на поверхность референц-эллипсоида; б — схема влияния кривизны Земли при измерении расстояний и высот

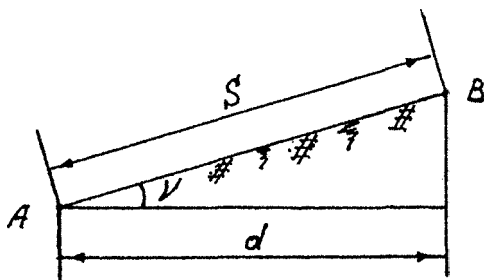


Рис. 8

$$H_M = H_M^* + \xi^M, \quad (4)$$

где H_M^* – ортометрическая высота, ξ^M – высота точки M_1 над поверхностью эллипсоида.

Исследования Молоденского показали, что без привлечения гипотез о внутреннем строении Земли оба слагаемых выражения (3) нельзя вычислить. Зато можно вычислить точно оба слагаемых выражения (4), в котором H_M^* – нормальная высота, ξ^M – аномалия высоты или высота квазигеоида над поверхностью референц – эллипсоида. Для вычисления геодезических высот H в СССР в настоящее время применяется формула (4), предусматривающая использование системы нормальных высот H^* и аномалий высот ξ .

Выделение в высоте H двух слагаемых связано с практической необходимостью отсчета высот от уровня моря. В системе ортометрических высот поверхностью уровня моря является поверхность геоида, а в системе нормальных высот за поверхность моря принимается вспомогательная поверхность квазигеоида.

Точно высоту H^* определяют методом геометрического нивелирования – метода, при котором с помощью горизонтального луча визирования вначале определяют разности высот двух соседних точек, а затем по известной высоте одной из них находят высоту второй точки. Влияние непараллельности уровенных поверхностей поверхности квазигеоида учитывается по гравиметрическим данным (в принципе, аномалии высот можно вычислить по формуле Брунса: $\xi = T/v$, в которой T – возмущающий потенциал, v – значение нормальной силы тяжести для точки поверхности эллипсоида. Более подробно см. П.С. Закатов. Курс высшей геодезии – М.: Недра, 1976). В публикуемых каталогах приводятся нормальные высоты H^* реперов и центров триангуляции.

§ 9. Изображение поверхности эллипсоида на плоскости.

Физическая поверхность Земли, на которой выполняются геодезические измерения, в различных точках по-разному отступает от референц-эллипсоида, поэтому в высшей геодезии при математической обработке результатов измерений их относят на поверхность референц-эллипсоида. Расстояние S между точками A и B (рис. 7,а) поверхности Земли при проектировании на поверхность референц-эллипсоида будет равно S_0 . При решении многих задач в топографии и картографии поверхность Земли принимается за поверхность шара, а в некоторых случаях даже за плоскость.

Определим размеры участка, на котором уровенную поверхность можно считать плоскостью. На рис. 7, б изображена касательная в точке A к дуге CAB радиуса R . Расстояние по дуге AB равно S , расстояние по касательной равно t . Разность между расстоянием по касательной и по дуге $\Delta S = t - s$.

Из прямоугольного треугольника OAB_1 : $t = R \operatorname{tg} \alpha$. С другой стороны, $S = R\alpha$, где угол α выражен в радианах, тогда

$$\Delta S = R(\operatorname{tg} \alpha - \alpha).$$

Раскладывая $\operatorname{tg} \alpha$ в ряд и ограничиваясь вследствие малости угла α первыми двумя членами разложения, получаем

$$\operatorname{tg} \alpha = \alpha + \frac{1}{3} \alpha^3.$$

После подстановки значения $\operatorname{tg} \alpha$ в предыдущую формулу получаем

$$\Delta S = R \frac{\alpha^3}{3},$$

Но $\alpha = \frac{S}{R}$, следовательно,

$$\Delta S = \frac{S^3}{3R^2} \approx \frac{l^3}{3R^2}.$$

Ниже приведены значения ΔS и относительные ошибки $\Delta S/S$ при различных значениях l ($R = 6371$ км).

l , км.....	10	50	100
ΔS , см.....	0,82	26	820
$\Delta S/S$	1/1 218 000	1/195 000	1/12 200

В настоящее время предельная точность измерений линий характеризуется относительной ошибкой 1/1 000 000. Таким образом, на участке радиусом 10 км влияние кривизны Земли во всех случаях при измерении горизонтальных расстояний можно не учитывать, т.е. поверхность Земли можно считать плоской.

При определении высот замена урвненной поверхности CAB (см. рис. 7, б) касательной t приводит к ошибке Δh в высоте определяемой точки.

Из прямоугольного треугольника OAB_1 :

$$l^2 = (R + \Delta h)^2 - R^2; \quad l^2 = R^2 + 2R\Delta h - R^2;$$

$$l^2 = 2R\Delta h + \Delta h^2; \quad l^2 = \Delta h(2R + \Delta h);$$

$$\Delta h = \frac{l^2}{2R + \Delta h}.$$

Поскольку Δh мало по сравнению с R и l ,

$$\Delta h = \frac{l^2}{2R}.$$

Для примера, при расстоянии $l = 1000$ м получается $\Delta h = 7,8$ см. точность определения высот в топографических измерениях порядка 5 см, поэтому влияние кривизны Земли необходимо учитывать.

Глава 2 Карты и планы

§ 10. Понятие о карте и плане.

До недавнего времени карту определяли как уменьшенное изображение земной поверхности на плоскости. Но такое определение неточно и неполно. Карту от других изображений земной поверхности отличают следующие особенности: математически определенное построение, использование особых знаковых систем (картографических символов), отбор и обобщение изображаемых явлений, а так же системное отображение действительности. Математически определенное построение карт заключается в установлении строгой математической зависимости между географическими координатами точек земной поверхности и прямоугольными – тех же точек на плоскости. Этот процесс включает в себя два действия – проецирование физической поверхности Земли, отличающейся сложным рельефом, картографируемых явлений и объектов на математическую поверхность, за которую принимают поверхность референц – эллипсоида, а также изображение поверхности эллипсоида в требуемом масштабе на плоскости. Для перехода от поверхности эллипсоида к плоскости используют те или иные математические способы, называемые картографическими проекциями.

Топографическим планом называется уменьшенное и подобное картографическое изображение на плоскости ортогональной проекции небольшого участка местности, в пределах которого кривизна уровенной поверхности не учитывается.

При составлении плана измеренные на местности линии ортогонально проецируются на горизонтальную плоскость. Горизонтальную проекцию линии S – горизонтальное положение d (рис. 8) определяют по формуле

$$d = S \cos \nu,$$

где S – расстояние, измеренное между точками A и B на местности; ν – угол наклона местности.

§ 11. Масштаб. Точность масштаба.

Масштабом плана называется отношение длины отрезка на плане к длине горизонтального проложения соответствующего отрезка на местности. Масштаб плана постоянен во всех его частях. На картах различают частный масштаб и главный масштаб.

Частный масштаб есть отношение бесконечно малого отрезка Δd на карте (на плоскости) к соответствующему ему отрезку на поверхности эллипсоида ΔS :

$$\frac{1}{m} = \frac{\Delta d}{\Delta S}.$$

Масштаб карты различен в разных ее точках: на карте указывается обычно единственное значение масштаба – *главный* (или *общий*) *масштаб*. На картах, охватывающих большие территории, имеются значительные отклонения частных масштабов от главного. Поэтому на таких картах указывают точки или линии картографической сетки, на которых соблюдается главный масштаб. Например, масштаб 1:2 000 000 на параллели 45° . Главным масштабом можно пользоваться по всей карте без ущерба для точности при работе с топографическими (картами масштабов 1:1 000 000 и крупнее).

По способу выражения различают численный, графический и именованный масштабы.

Численный масштаб выражают в виде простой дроби $1/M$. Знаменатель масштаба является отвлеченным числом, показывающим, во сколько раз уменьшены горизонтальные проложения линий местности при изображении их на карте. Чем больше знаменатель численного масштаба M , тем масштаб мельче, и наоборот, чем меньше знаменатель M , тем крупнее масштаб.

При пользовании численным масштабом приходится выполнять вычисления, которые при большом объеме работ занимают значительное время. В этих случаях пользуются графическим масштабом (линейным или поперечным).

Именованный масштаб указывает длину линии на местности, соответствующую определенному отрезку на карте (например, в 1 см 10 км).

Точность масштаба

Невооруженный глаз может различать на карте отрезок не менее 0,1 мм. Горизонтальный отрезок на местности, соответствующий на карте 0,1 мм, называется точностью масштаба. Точность масштабов 1:1 000 000, 1:100 000 и 1:25 000 соответственно равна 100, 10 и 2,5 м.

§ 12. Понятие о картографических проекциях.

Картографическая проекция – математически определенный способ изображения поверхности земного эллипсоида на плоскости, при котором каждой точке земного эллипсоида соответствует взаимно-однозначная точка плоскости.

Общие формулы картографических проекций, связывающие геодезические координаты точки B, L на эллипсоиде с прямоугольными координатами ее на плоскости, следующие:

$$x = f_1(B, L), \quad y = f_2(B, L).$$

Эти формулы позволяют вычислять прямоугольные координаты изображаемой точки по

геодезическим координатам B и L . Число проекций и, следовательно, формул проекций множество. Необходимы условием каждой проекции является однозначное соответствие точек с координатами B, L на эллипсоиде точкам с координатами x, y на плоскости и непрерывность изображения.

Поверхность эллипсоида (или шара) невозможно развернуть на плоскость без деформаций (сжатия или растяжения), поэтому требование непрерывности и однозначности изображения приводит к деформации поверхности эллипсоида при изображении ее на плоскости. В результате масштаб изображения поверхности на плоскости в разных частях получается разным. Из теории математической картографии известно, что бесконечно малая окружность на поверхности эллипсоида изображается на плоскости эллипсом, называемом *эллипсом искажений*.

Масштаб изображения зависит не только от положения точки, он изменяется от точки к точке в зависимости от направления. На карте различают главный (или общий) масштаб и частный масштаб (см §11). Отличие частного масштаба от главного характеризует искажение длины.

Искажение площади характеризуется отношением площади эллипса искажений dP' на карте к площади dP соответствующего бесконечно малого круга на эллипсоиде.

$$n = \frac{dP'}{dP}.$$

Искажением угла называют разность между углом, образованным двумя линиями на эллипсоиде, и изображением этого угла на карте. Искажения углов различны для различных направлений, выходящих из точки. В качестве характеристики искажения углов в данной точке указывается наибольшее значение искажения.

Картографических проекций без искажений не существует. В проекциях без искажений сохранялись бы подобие и пропорциональность геометрических фигур на всей земной поверхности, что возможно только на модели земного эллипсоида. Однако имеются проекции, свободные от искажений углов или искажений площадей.

Проекции классифицируют по двум признакам: по характеру искажений и по виду координатной сетки. По характеру искажений различают равноугольные, равновеликие и произвольные проекции.

Равноугольные проекции передают без искажения углы геометрических фигур.

Равновеликие проекции сохраняют площади (масштаб площадей в каждой точке одинаков), но сильно нарушают подобие фигур.

Имеется множество проекций, которые не являются ни равновеликими, ни равноугольными и которые называются *произвольными*.

В большинстве случаев при создании карт пользуются географическими координатами — широтой φ и долготой λ . В картографической проекции (на карте) географическая система координат задается картографической сеткой параллелей и меридианов, которая называется *основной*. Кроме основной в картографии пользуются нормальной картографической сеткой.

Во многих проекциях основная и нормальная сетки совпадают, но иногда более простой вид в проекции имеет какая-либо другая сетка, которую можно построить на поверхности шара или эллипсоида. Для шара, например, применяется система сферических координат, аналогичная географической системе, однако ее полюс с географическими координатами φ_0, λ_0 может занимать различные положения. Координатные линии нормальной системы, аналогичные параллелям, называются альмукантаратами, а линии, аналогичные меридианам, — *вертикалами*.

Когда полюс нормальной системы совпадает с географическим полюсом ($\varphi_0 = 90^\circ$), сеть вертикалов и альмукантаратов сливается с сетью меридианов и параллелей, основная и нормальная сетки совпадают и проекция называется нормальной. При совпадении полюса сферической системы с экватором ($\varphi_0 = 0^\circ$) вертикалы и альмукантараты не совпадают с меридианами и параллелями, и проекция называется поперечной. В том случае, когда полюс сферической системы находится между полюсом и экватором ($0 < \varphi_0 < 90^\circ$), вертикалы и альмукантараты также не совпадают с меридианами и параллелями, и проекция называется косою.

По виду меридианов и параллелей нормальной сетки различают проекции азимутальные, конические, цилиндрические, псевдоконические, поликонические, круговые и др.

Рассмотрим примеры некоторых картографических проекций.

Азимутальные проекции

В азимутальных проекциях альмукантараты изображаются концентрическими окружностями, вертикалы — в виде прямых, выходящих из центра этих окружностей; углы между вертикалами на проекции равны соответствующим углам в натуре. По положению центра сферических координат они могут быть нормальными, поперечными и косыми.

Для примера на рис. 9, а приведена нормальная азимутальная проекция, применяющаяся для изображения полярных областей земного шара. В ней альмукантараты совпадают с параллелями, а вертикалы — с меридианами.

По характеру искажений азимутальные проекции могут быть самыми разнообразными.

Конические проекции

В конических проекциях альмукантараты сферической системы координат изображаются дугами концентрических окружностей, а вертикалы — прямыми, сходящимися в общем центре окружностей; углы между вертикалами пропорциональны соответствующим углам в натуре, коэффициент пропорциональности может принимать значения $0 < k < 1$. На рис. 9, б показана нормальная коническая проекция (в ней меридианы совпадают с вертикалами, а параллели — с альмукантаратами).

Для пояснения построения конических проекций можно представить, что поверхность эллипсоида или шара изображается на боковой поверхности конуса (касательной или секущей), определенным образом ориентированной относительно оси вращения эллипсоида или шара. Затем поверхность конуса разворачивается в плоскость.

В косых и поперечных конических проекциях меридианы и параллели изображаются сложными кривыми.

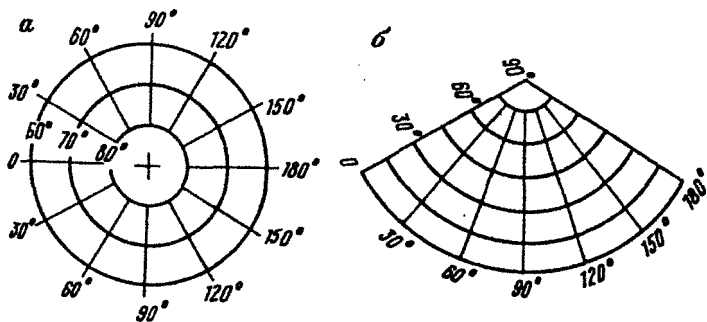


Рис. 9. Виды проекций:

а — нормальная азимутальная; б — нормальная коническая

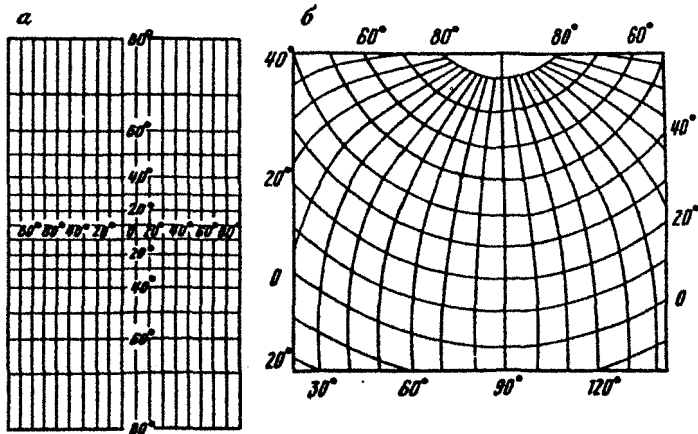


Рис. 10. Виды проекций:

а — нормальная цилиндрическая; б — псевдоконическая

Цилиндрические проекции

Схематически построение таких проекций можно пояснить, если представить, что поверхность эллипсоида (или шара) проектируется на боковую поверхность цилиндра, касательную или секущую, и определенным образом ориентированную относительно эллипсоида или шара. Боковая поверхность цилиндра разрезается по одной из образующих и разворачивается в плоскость.

При совпадении оси цилиндра с осью эллипсоида получается нормальная цилиндрическая проекция. При пересечении этих осей под прямым углом получается поперечная. Когда ось цилиндра и ось земного эллипсоида пересекаются под острым или тупым углом, получаются косые цилиндрические проекции.

На рис. 10, а показана нормальная цилиндрическая проекция. В этой проекции меридианы изображены прямыми, параллельными между собой и отстоящими друг от друга на расстояниях, пропорциональных разности соответствующих долгот, а параллели изображены прямыми, перпендикулярными к меридианам.

Псевдоконические проекции

В псевдоконических проекциях параллели изображаются дугами одноцентренных окружностей, меридианы – кривыми линиями, симметричными относительно среднего, который изображается прямой линией; на этой прямой лежит центр окружностей – параллелей. На рис 10, б приведена одна из псевдоконических проекций.

Псевдоцилиндрические проекции

В псевдоцилиндрических проекциях параллели нормальной сетки изображаются параллельными прямыми, а меридианы – кривыми линиями, симметричными относительно среднего, который является прямой и к которому перпендикулярны параллели.

На рис. 11 приведена псевдоцилиндрическая проекция Сансона, в ней меридианы имеют вид синусоид, на всех параллелях и на среднем меридиане длины сохраняются.

Поликонические проекции

В поликонических проекциях параллели нормальной сетки изображаются дугами разноцентренных окружностей, меридианы – в виде кривых, симметричных относительно среднего, который является прямой линией; на этой линии лежат центры дуг окружностей параллелей.

При составлении карт используются различные поликонические проекции, в частности, простая поликоническая проекция, в которой сохраняются длины на среднем меридиане и на всех параллелях.

Многогранные проекции

Многогранные проекции не являются самостоятельным видом проекций, а представляют собой вариант использования рассмотренных ранее проекций. Многогранные проекции применяются при составлении карт крупных и средних масштабов, когда поверхность Земли в целях уменьшения искажения в проекции изображается по частям, и карта состоит из отдельных листов.

При этом земную поверхность разделяют меридианами и параллелями на правильные

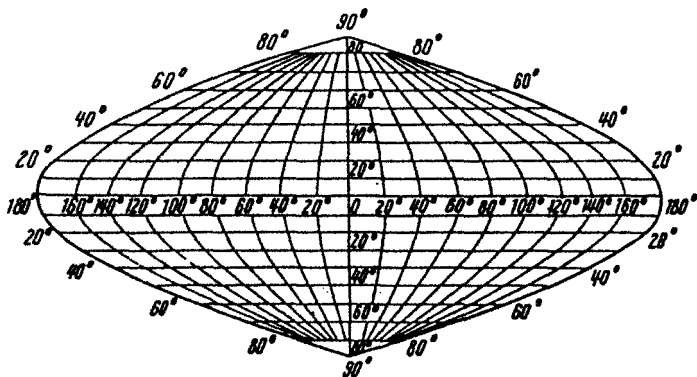


Рис. 11. Псевдоцилиндрическая проекция Сансона

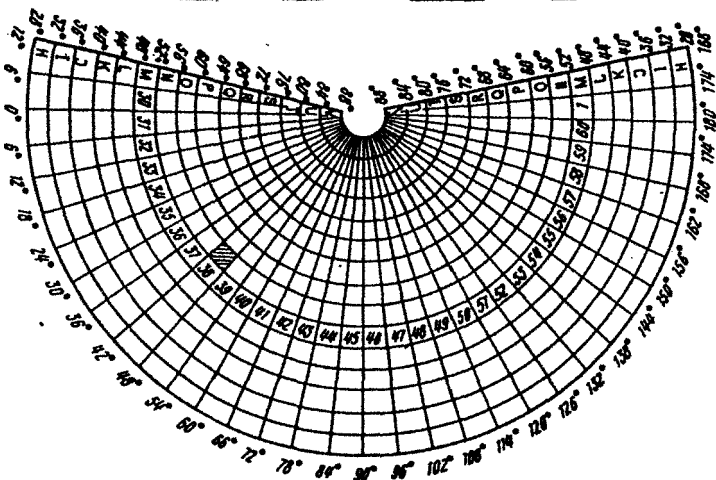


Рис. 12. Разграфка карты масштаба 1:1 000 000

трапеции, размер сторон которых устанавливается в зависимости от масштаба карты, для обозначения трапедий используется специальная система.

Поверхность Земли, заключенная в трапеции, изображается на плоскости с использованием одной из проекций (конической, поликонической и т.д.).

§ 13. Карты общегеографические и топографические.

Карты можно классифицировать по ряду признаков: масштабу, территориальному охвату, теме, назначению, математической основе и т.п.

При классификации карт по тематике (содержанию) прежде всего различают карты общегеографические и тематические. В свою очередь общегеографические карты подразделяются на обзорные, обзорно – топографические и топографические.

Если классифицировать карты по масштабу, то можно выделить : мелкомасштабные (мельче 1:1 000 000), среднемасштабные (мельче 1:200 000) и крупномасштабные (1:200 000 и крупнее).

Топографические карты имеют свое деление по масштабам: мелкомасштабные (1:50 000; 1:100 000; 1:200 000), среднемасштабные (1:10 000; 1:25 000), крупномасштабные или топографические планы (1:500; 1:1000; 1:2000; 1:5000).

Топографические карты России создаются в равноугольной поперечно – цилиндрической проекции Гаусса – Крюгера. Система высот на этих картах Балтийская. Поскольку топографические карты многолистные, для обозначения каждого листа карты применяется специальная система обозначений листов – *наименование*.

Система деления карт на листы называется *разграфкой*. Для топографических карт и планов используют две системы разграфки. Так, для карт мелких, средних и большинства крупных масштабов границами листов карт служат линии картографической сетки (линии меридианов и параллелей). А для некоторых планов масштабов 1:1000 и 1:500 границами листов служат линии прямоугольной координатной сетки (координатные линии).

Таблица 3

Разграфка топографических карт

Масштаб	Размеры листа		Средняя площадь листа на широте, 54, км ²	Количество листов в одном листе карты 1:1 000 000	Номенклатура
	По широте	По долготе			
1:1 000 000	4°	6°	175 104	1	N-38
1:500 000	2°	3°	43 776	4	N-38-A
1:200 000	40'	1°	4864	36	N-38-XXII
1:100 000	20'	30'	1216	144	N-38-133
1:50 000	10'	15'	306	576	N-38-133-A
1:25 000	5'	7°30'	76	2304	N-38-133-A-a
1:10 000	2'30"	3'45"	19	9216	N-38-133-A-a-2
1:5000	1'15"	1'52,5"	-	-	N-38-133-(251)
1:2000	25"	37,5"	-	-	N-38-133-(125-e)

В основу номенклатуры российских карт положена международная разграфка листов карты масштаба 1:1 000 000. Лист карты этого масштаба занимает 4° по широте и 6° по долготе (табл.3). При делении поверхности земного шара (рис. 12) параллелями от экватора через 4° получаются *полюса*, которые обозначаются буквами латинского алфавита от *A* до *V*, начиная от экватора к северу и к югу. А при делении меридианами через 6° образуются *колонны*, которые нумеруются арабскими цифрами, начиная от меридиана с долготой 180° в направлении с запада на восток. Номенклатура листа карты масштаба 1:1 000 000 складывается из буквы, которой обозначен пояс, и из номера колонны. Заштрихованный на рис. 12 лист имеет номенклатуру *N-38*.

Разграфка листов карты масштаба 1:500 000 производится делением каждого листа карты масштаба 1:1 000 000 на четыре части (рис. 13, а). Номенклатура листа карты этого масштаба складывается из номенклатуры листа карты масштаба 1:1 000 000 и соответствующей заглавной буквы русского алфавита от *A* до *Г*. на рис. 13, а штриховкой показан лист карты масштаба 1:500 000 с номенклатурой *N-38-B*.

Разграфка листов карты масштабов 1:200 000 и 1:100 000 выполняется делением каждого листа карты масштаба 1:1 000 000 параллелями и меридианами соответственно на 36 и 144 части. На рис. 13, б – показан лист карты масштаба 1:200 000 с номенклатурой *N-38-XXII*. На рис. 13, в показана разграфка и обозначение листов карты масштаба 1:100 000, заштрихован лист с номенклатурой *N-38-118*.

Номенклатура карты масштаба 1:50 000 получается делением листа карты масштаба 1:100 000 (рис. 14,а) на четыре части, которые обозначаются заглавными буквами русского алфавита. На рис. 14, а показан штриховкой лист карты масштаба 1:50 000 с номенклатурой *N-38-118-Г*.

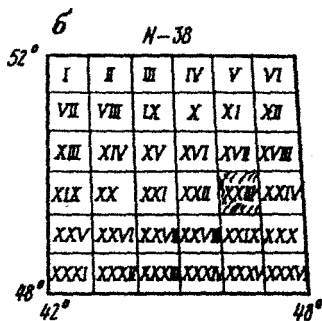
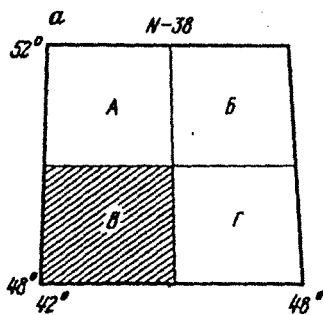


Рис. 13. Разграфка листов карт масштабов
а — 1:500 000; б — 1:200 000; в — 1:100 000

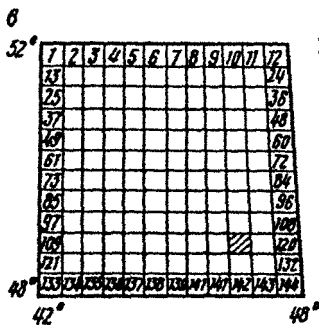
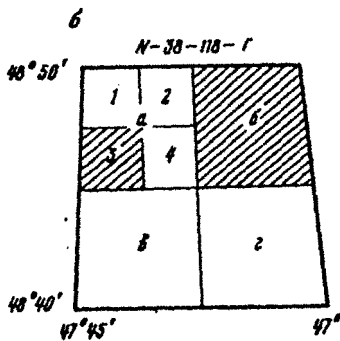
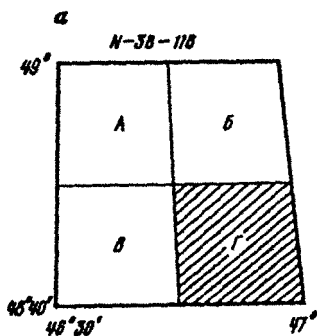


Рис. 14. Разграфка листов карт масштабов
а — 1:500 000; б — 1:250 000 и 1:100 000



Номенклатура листов карты масштаба 1:25 000 получается делением листа карты масштаба 1:50 000 на четыре части и обозначением частей строчными буквами русского алфавита *а, б, в, г*, (рис. 14, *б*).

Номенклатура листов карты масштаба 1:10 000 образуется делением листа карты масштаба 1:25 000 на четыре части и обозначением получившихся частей арабскими цифрами 1, 2, 3, 4, на рис. 14, *б* штриховкой показан лист карты масштаба 1:25 000 с номенклатурой *Н-38-118-Г-б* и лист карты масштаба 1:10000 с номенклатурой *Н-38-118-Г-а-3*.

Для разграфки масштаба 1:5000 лист карты масштаба 1:100000 делят на 256 частей, которые обозначают арабскими цифрами в скобках. А для разграфки карты масштаба 1:2000 лист карты масштаба 1:5000 делят на 9 частей и обозначают строчными буквами русского алфавита от *а* до *и*.

В высоких широтах листы топографических карт получаются узкими и неудобными для практического использования. Поэтому было принято, что к северу от параллели 60° листы топографических карт составляются и издаются сдвоенными по долготе, а севернее параллели 76° - счетверенными. В табл.3 приведены данные о разграфке листов топографических карт и планов различных масштабов.

Специфичной является разграфка и номенклатура морских навигационных карт. Размеры листов и их границы выбираются такими, чтобы каждый лист включал полностью определенную в навигационно - географическом отношении часть побережья или моря. Поэтому листы морских карт различны по своим размерам. Кроме того, листы морских карт имеют взаимные перекрытия (находы). Это делается для облегчения (при прокладке пути корабля) перенесения места корабля при переходе с одного листа на другой. Листам морских карт присваиваются в каждой стране свои порядковые номера (называемые гидрографическими и адмиралтейскими) по мере изготовления новых листов, независимо от их масштаба и моря.

Рамки всех навигационных карт, имеющих для бассейна, и номера, присвоенные картам (не повторяющихся на картах, издаваемых гидрографической службой страны), обозначаются на мелкомасштабной карте бассейна, которая называется *сборным листом*.

По сборному листу видна обеспеченность бассейна навигационными картами и по нему можно выбрать необходимые для навигации карты. Гидрографические службы разных стран издадут каталоги карт, в которых помещают сборные листы. Каталоги карт сопровождают лонии - руководства для плавания, в которых содержатся описания водных бассейнов, поясняющие и дополняющие морские навигационные карты.

§ 14. О картографической генерализации.

Генерализация в переводе обозначает обобщение. *Картографическая генерализация* - это отбор и обобщение изображаемых на карте объектов, соответственно назначению и масштабу карты и особенностям картографируемой территории.

Назначение карты воздействует на ее содержание. Например, общегеографическая карта и карта для преподавания географии в школе отличаются тем, что на первой помещено

множество географических объектов, изображенных достаточно точно и детально, в то время как на второй число объектов значительно меньше и они показаны схематичнее и крупнее. Применение крупных условных знаков и шрифтов, и в связи с этим большая степень генерализации, вызваны назначением карты, демонстрируемой в классе на значительном расстоянии.

Масштаб карты во многом определяет размер изображенной на карте территории. Карты мелкого масштаба охватывают значительные территории. Карты крупного масштаба изображают в рамках отдельных листов небольшие участки земной поверхности, для больших территорий необходимо большое число листов таких карт. Различный пространственный охват приводит к различному подходу в изображении деталей. То, что для участков небольшого размера является важной деталью, для больших территорий может оказаться второстепенным или совсем потерять значение. Например, на административной карте района подробно показывается сеть местных дорог, в том числе и грунтовых. На карте республики эти дороги явились бы балластом, поскольку на ней важно отчетливо показать дорожную сеть, связывающую районные и областные центры. Отсюда следует, что генерализация, связанная с масштабом, с уменьшением общего размера изображения, необходима не только из-за недостатка места, но и для перехода к обобщающим явлениям более высокого уровня.

Для пояснения фактора генерализации – отображения на карте особенностей картографируемой территории – укажем на то, что одни и те же объекты по – разному оцениваются для различных ландшафтов или для изображения различных явлений. Например, колодцы в населенных пунктах европейской территории СССР на топографических картах мелкого масштаба, как правило, не показывают, а на тех же картах пустынных и полупустынных районов – важнейший элемент содержания. При изображении рельефа в горной местности на картах применяют высоту сечения в два – четыре раза большую, чем в плоскоравнинной.

Задача генерализации состоит не только в устранении избыточной информации, но и в выявлении основных, существенных характеристик картографируемых явлений.

Виды (принципы) генерализации

В процессе генерализации отбирают картографируемые явления, обобщают их количественные и качественные характеристики, графически обобщают контуры изображаемых объектов и переходят от простых объектов к более сложным, применяют их собирательные обозначения.

Отбор картографируемых явлений связан с тем, что карта всегда отображает лишь некоторые явления действительности, существенные с точки зрения назначения карты, ее тематики, масштаба и особенностей территории. В ходе отбора руководствуются цензами, устанавливающими уровни отбора объектов разных категорий. Применяются исключающие цензы, по которым с карты устраняются объекты (например, все реки длиной менее 1 см в масштабе карты) и избирательные цензы, указывающие объекты, обязательно изображаемые на карте (например, все районные административные центры).

В ходе отбора устанавливают норму отбора или «норму представительства», т.е.

назначают количество сохраняемых объектов, например, устанавливают для данной территории количество населенных пунктов, показываемых на 1 дм² карты (количество населенных пунктов, показываемых на 1 дм² карты масштаба 1:100 000, изменяется от 140 до 60 в зависимости от плотности и величины населенных пунктов на местности).

Обобщение количественной характеристики изображаемых объектов заключается в переходе от непрерывной шкалы к ступенчатой, в укрупнении интервалов (ступеней), внутри которых изменения количественной характеристики не находят на карте отражения. Например, на картах масштабов 1:10 000 – 1:100 000 четырехступенчатая градация сельских населенных пунктов (более 1000 жителей, от 500 до 1000 жителей, от 100 до 500 жителей и менее 100 жителей) заменяется двухступенчатой при переходе к карте масштаба 1:1 000 000 (более 1000 жителей и менее 1000 жителей).

Обобщение качественной характеристики применяется для сокращения качественных различий в данной категории объектов. Например, это достигается посредством замены мелких классификаций обобщенными (например, при переходе от карт топографических к географическим, заменяют особые знаки для лесов хвойных, лиственных и смешанных единым знаком леса), а также за счет исключения низких ступеней классификации (например, при характеристике населенных пунктов по административному признаку исключают особые знаки для районных центров и сельсоветов).

Геометрическая пространственная генерализация заключается в продуманном упрощении плановых очертаний изображаемых объектов – линейных, площадных – с сохранением особенностей очертаний, характерных для данного объекта. Один из приемов геометрической пространственной генерализации – применение внесматштабных условных знаков для изображения объектов «точечных» в натуре, или площади которых не выражаются в масштабе карты (геодезические пункты, указатели дорог, родники).

Замена отдельных объектов собирательными обозначениями, т.е. замена отдельных объектов обозначениями обобщающими, например, замена перемежающихся мелких контуров кустарника и луга обобщающим знаком кустарника по лугу без указания границ отдельных контуров.

Генерализация в передаче рельефа на карте необходима для выявления и отображения с помощью горизонталей и других способов типичных черт и характерных особенностей поверхности картографируемой местности. Поверхность земли обычно имеет множество мелких неровностей частного характера, изобилие которых затемняет общие закономерности строения более крупных форм. В процессе генерализации за счет исключения некоторых элементов и форм рельефа сохраняют и изображают на карте общие черты строения рельефа.

На картах разного масштаба одной и той же территории генерализация в изображении рельефа проявляется в увеличении высоты сечения рельефа и в результате обобщения очертания горизонталей. За счет этого на карте не изображаются мелкие формы рельефа, оказывающиеся внутри увеличенных высотных ступеней. В табл. 2 показаны высоты сечения рельефа, назначаемые в зависимости от масштаба топографической карты и характеристики территории.

Очень важно сохранить особенности картографируемых объектов, поэтому на картах стремятся выделять структурные линии рельефа: водоразделы, тальвеги, бровки и подошвы склонов. Этим достигается правильная передача взаимосвязей форм рельефа.

Горные склоны с угловатыми характеристиками расчленяющих форм передают на картах угловатыми изгибами горизонталей в полном соответствии с натурой.

§ 15. Зональная проекция Гаусса – Крюгера.

В Российской Федерации для составления топографических карт масштабов 1:1 000 000 и крупнее применяется проекция Гаусса – Крюгера (равноугольная, поперечная, цилиндрическая).

В 1825 г. была опубликована работа Гаусса, впервые решившего общую задачу об изображении одной поверхности на другой с сохранением подобия в бесконечно малых частях. Частным случаем этой общей задачи является картографическая задача – изображение поверхности эллипсоида вращения на плоскости. В 1912 г. Крюгер разработал рабочие формулы этой проекции. Поэтому такую проекцию теперь называют проекцией Гаусса – Крюгера.

В проекции Гаусса – Крюгера поверхность земного эллипсоида проектируется на плоскость по частям – зонам. Зона занимает 6° по долготе (иногда применяются зоны, занимающие 3° по долготе). Нумерация зон ведется от нулевого меридиана на восток (рис. 15). Каждая зона в отдельности проектируется на плоскость так, чтобы сохранялось подобие бесконечно малых фигур. Центральный меридиан зоны и экватор (см. рис. 15) изображаются в виде взаимно перпендикулярных прямых, образующих координатные оси X и Y . остальные меридианы и параллели изображаются кривыми, причем меридианы симметричны относительно осевого меридиана, параллели симметричны относительно экватора. В этой проекции длина осевого меридиана передается без искажений, длины остальных линий получаются длиннее, по сравнению с их горизонтальными проекциями на уровенную поверхность. Величину искажения (удлинения) линий на плоскости можно вычислить по формуле

$$\Delta S = \frac{y_{cp}^2}{2R^2} S,$$

В которой y_{cp} – расстояние от центрального меридиана зоны до средней точки линии; S – длина кривой на поверхности эллипсоида; R – радиус земного шара.

По мере удаления от осевого меридиана искажения линий возрастают и достигают 0,14% на краях зоны (в трехградусных зонах эти искажения примерно в 4 раза меньше).

Если известен номер колонны Q , то номер координатной зоны проекции Гаусса – Крюгера n определяется из выражения:

$$n = Q - 30.$$

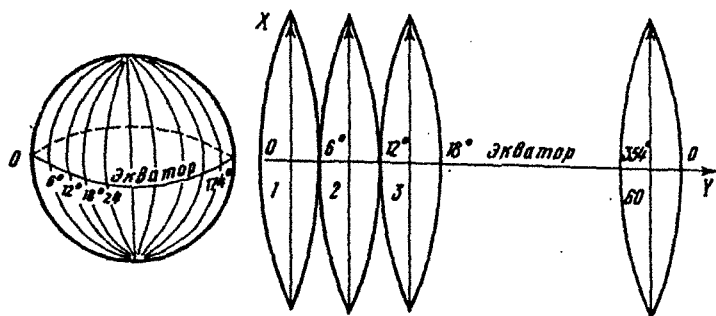


рис. 15 Шестиградусные зоны проекции Гаусса – Крюгера

Долгота осевого меридиана листа карты масштаба 1:1 000 000 или долгота осевого меридиана координатной зоны L_0 вычисляется по формуле

$$L_0 = 6^\circ Q - 183^\circ \text{ или } L_0 = 6^\circ n - 3.$$

Для вычисления прямоугольных координат проекции Гаусса – Крюгера по широте и долоте точки существуют специальные таблицы, например, «Таблицы координат Гаусса – Крюгера для широт от 32 до 80° через 5' и долгот от 0 до 3,5° через 7,5' и таблицы рамок и площадей трапеций».

На территории России все абсциссы положительны. Чтобы ординаты точек были тоже положительными, ординату начала координат принимают равной 500 км. А для того, чтобы было ясно, о какой зоне идет речь, к ординатам точек приписывают номер зоны, например: $y = 7\ 381\ 252\ \text{м}$ – зона седьмая, точка находится к западу от осевого меридиана на 118 748 м.

Ординаты точек, исправленные на 500 км и имеющие номер зоны, называются преобразованными ординатами. Для облегчения определения прямоугольных координат точек на картах, параллельно осям X и Y , проведены линии сетки прямоугольных координат.

При изображении земной поверхности в проекции Гаусса – Крюгера между соседними зонами образуются разрывы, поэтому при работе с картами на границах смежных зон возникают определенные неудобства. Эти неудобства устраняются введением полос перекрытия шириной 2° вдоль западной и восточной границ каждой зоны. На всех листах топографических карт, расположенных в пределах этих полос, даются выходы координатной сетки своей зоны и дополнительно наносятся выходы координатной сетки соседней зоны.

§ 16. Условные знаки топографических карт.

Картографическими условными знаками называют графические символы, применяемые на картах для обозначения различных объектов и их характеристик. Кратко их называют условными знаками. Они указывают: вид объекта (колодец, шоссе, болото и т.д.); количественные и качественные характеристики его (дебит колодца, вид покрытия, ширину проезжей части шоссе, проходимость болота и т.д.); пространственное положение, плановые размеры и форму объекта.

Различают *внемасштабные*, *линейные* и *площадные* условные знаки. *Внемасштабные* знаки определяют местоположение (точку) предмета, а размеры предметов по ним определить нельзя, например, родники, геодезические пункты, отдельно стоящие деревья.

Линейными условными знаками изображают объекты, имеющие значительную протяженность (границы, дороги, линии связи, трубопроводы и др.). *Площадными* (*масштабными*) условными знаками обозначают объекты, изображение которых подобно оригиналу (по ним можно определить размеры и форму объектов).

Для топографических карт каждого масштаба применяются единые топографические условные знаки. Условные топографические знаки выбираются такими, чтобы они давали

ясное и наглядное представление о местности и по своему начертанию напоминали бы вид и характер изображаемых предметов. Хорошее знание условных знаков необходимо для того, чтобы по карте можно было представить изображаемую местность. Примеры условных топографических знаков приведены на рис. 16.

§ 17. Изображение рельефа на топографических картах.

Рельеф местности – это совокупность неровностей земной поверхности. Рельеф – весьма сложная для изображения поверхность. Сложность изображения рельефа связана с тем, что обычно мы наблюдаем его в перспективе, тогда как на карте его изображают ортогонально. Для топографических карт основным методом изображения рельефа является метод горизонталей (изогипс).

Горизонталь – замкнутая кривая линия, изображающая геометрическое место точек земной поверхности одинаковой высоты. Отдельно взятая горизонталь недостаточна для изображения элементов рельефа. Для передачи поверхности необходима система таких линий. Чтобы представить геометрическую сущность горизонталей, вообразим бассейн, в середине которого находится участок земной поверхности. Отметим береговую линию уреза воды, далее будем снижать уровень воды равными ступенями и отмечать полученные замкнутые кривые, представляющие собой горизонталы (рис. 17). Расстояние между соседними горизонталями по отвесной линии h называется *высотой сечения рельефа*; значение высоты сечения указывается на каждом листе карты под линейным масштабом. Расстояние между горизонталями в плане d называется *заложением*.

Из определения горизонталей вытекают следующие их свойства: горизонталы – замкнутые кривые; горизонталы не могут пересекаться; чем меньше расстояние между горизонталями на карте данного масштаба, тем круче скат на местности.

Выбор высоты сечения рельефа связан с масштабом карты и характером рельефа. На обзорных картах важно видеть крупные и средние формы рельефа, для изображения которых применяется относительно большая высота сечения. На картах крупного масштаба должны быть показаны и малые формы, поэтому для их изображения применяют небольшую высоту сечения.

Получается, что чем меньше высота сечения, тем подробнее изображается рельеф. Существует определенное ограничение в изображении крутых склонов. Так, в 1 мм практически невозможно провести более четырех параллельных линий, с тем чтобы зрительно они воспринимались раздельно. Если предположить, что v – предельный угол склона участка местности, изображаемой горизонталями, а AC – минимальное горизонтальное расстояние между соседними горизонталями (0,25 мм на карте и 0,25 м, мм в натуре, где m – знаменатель численного масштаба карты), то значение минимальной высоты сечения (h мм) можно определить по формуле

$$h = AC \operatorname{tg} v = 0,25 m \operatorname{tg} v.$$

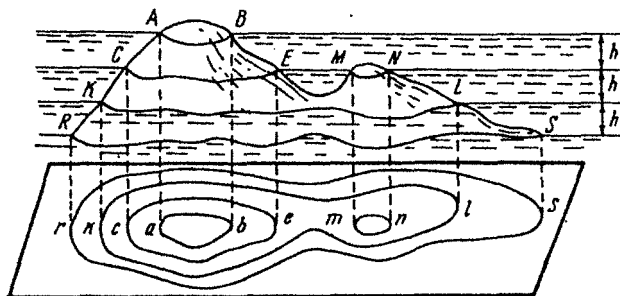


Рис. 17. Изображение рельефа горизонталями

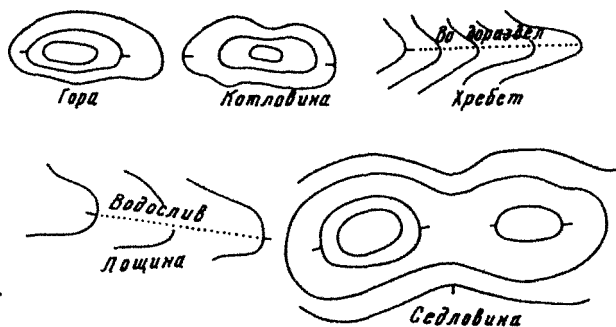


Рис. 18. Изображение горизонталями характерных форм рельефа

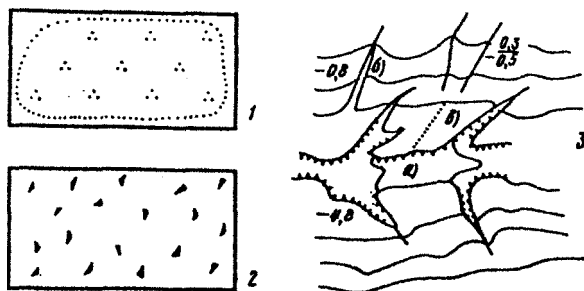


Рис. 19. Изображение на карте микроформ рельефа и оврагов:

1 - кочковатые поверхности; 2 - каменные поверхности (выходы монокристаллических пород); 3 - эрозионные формы рельефа: а - овраги; б - узкие овраги; в - эрозионные борозды. Характеристика овражных форм: 0,3 - ширина; -0,5-0,8; -4,8 - глубины, м

Для российских топографических карт приняты высоты сечения рельефа, указанные в табл. 4.

Средняя ошибка съемки рельефа – 1/3 высоты сечения. Средние ошибки высот характерных точек, подписываемых на карте, не должны превышать 75% средних ошибок съемки рельефа, а в горных и высокогорных районах должно соблюдаться соответствие числа горизонталей разности высот между перегибами склона.

Средние ошибки в положении горизонталей по высоте, относительно ближайших точек съемочного обоснования, на картах масштабов 1:50 000 и 1:100 000 плоскоравнинных районов не должны превышать соответственно 3 и 6 м, а равнинных, пересеченных и всхолмленных районов, с преобладающими углами наклона поверхности до 6° - 4 и 9 м. Предельные ошибки по высоте, превышающие удвоенные значения средних ошибок, на картах недопустимы.

Таблица 4 Высота сечения рельефа на топографических картах России

Характеристика территории	Высота сечения рельефа (м) для масштабов				
	1:10 000	1:25 000	1:50 000	1:100 000	1:200 000
Плоскоравнинные с уклоном местности до 1°	1,0	2,5	10	20	20
Равнинные с уклоном местности от 1 до 2°	1,0*; 2,0	2,5; 5,0**	10	20	20
Равнинные пересеченные и всхолмленные с уклоном местности от 2 до 6°	2,0 (2,5)	2,5***; 5,0	10	20	20
Высокогорные	–	10	20	40	80

* В районах мелиоративного строительства

** В залесенных районах

*** В открытых районах при уклонах до 4°

Ошибки в положении горизонталей на картах залесенных районов не должны превышать удвоенных ошибок, установленных для карт соответствующих незалесенных районов.

На картах горных, высокогорных районов, а также районов песчаных пустынь горизонтали должны географически правильно отображать формы рельефа, согласовываться с подписанными на картах отметками высот и высотами, определенными на перегибах склонов.

При помощи приведенных в табл. 4 сечений изображают склоны, крутизна которых не превышает 40°, при большей крутизне горизонтали сливаются.

В некоторых случаях установленные высоты сечения не обеспечивают передачу характерных особенностей рельефа. Для преодоления этих трудностей используют дополнительные горизонтали или применяют разные сечения рельефа для горных и равнинных районов.

Дополнительные горизонталы вычерчиваются прерывистыми линиями и применяются по мере необходимости для изображения деталей и форм, характерных для данного рельефа, но не изображенных основными горизонталями. Если необходимо, на картах проводят полугоризонталы или четвертьгоризонталы, т.е. горизонталы, кратные половине или четверти основного сечения. Иногда введение полугоризонталей или четвертьгоризонталей оказывается недостаточным. Так, в Прикаспийской низменности эти горизонталы не всегда отражают такие характерные формы рельефа, как лиманы (обширные понижения глубиной 1-2 м). В таких случаях вводят вспомогательные горизонталы произвольного сечения с обязательной подписью их высоты. Обычно на топографических картах в пределах отдельного листа высота сечения остается постоянной. Это необходимо для правильной передачи крутизны склонов. Изменение высоты сечения при изображении рельефа на отдельном листе создало бы на граничной горизонтали впечатление перегиба скатов.

Из табл. 4 следует, что высота сечения рельефа увеличивается с уменьшением масштаба карты. Увеличение сечения, пропорциональное уменьшению масштаба на картах мелкомасштабных, приводит к тому, что рельеф низменностей не изображается. Чтобы избежать этого, применяют так называемую шкалу горизонталей, в которой высота сечения увеличивается с увеличением высоты местности. Для карт масштабов 1:500 000 и 1:1 000 000 в России применяется шкала горизонталей, приведенная ниже.

Высотные пояса, м.....	150 – 500	500 – 1000	выше 1000
		(500 - 2000	(выше 2000 для
		для 1:500 000)	1:500 000)
Высота сечения, м	50	100	200

Шкалу горизонталей выбирают в результате изучения рельефа изображаемой территории. При этом используют профили местности по характерным направлениям. Для правильного изображения рельефа необходимо, чтобы высота сечения была бы меньше относительной высоты форм рельефа, изображение которых обязательно, иначе на карте вместо расчлененных горных систем может изобразиться плато. Помимо чисто математической передачи горизонталями рельефа как линиями равных высот, горизонталы своими очертаниями передают тип рельефа. Резким формам рельефа соответствуют извилистые и угловатые горизонталы, мягким формам – круглые и плавные.

Из многообразных форм рельефа в топографии выделяют следующие характерные формы (рис. 18).

Гора, холм, стопка. Основание горы называется подошвой, а ее наивысшая точка – вершиной. Вершина, имеющая форму пощадки, называется плато, а остроконечная вершина – пиком.

Котловина или впадина – это чашеобразное, замкнутое со всех сторон, углубление. Самая низкая часть котловины называется дном, верхняя ее часть называется бровкой.

Хребет – вытянутая возвышенность, постепенно понижающаяся в одном направлении.

Если на карте провести линию через точки с наибольшей кривизной горизонталей, изображающих хребет, то получится линия водораздела.

Лощина – вытянутое углубление местности, постепенно понижающееся в одном направлении. По лощине через точки с наибольшей кривизной горизонталей проходит линия водотока (водослив или тальвег).

Седловина – понижение между двумя соседними вершинами. В горах перевалы обычно приурочены к седловинам.

Вершина горы, дно котловины, низкая точка седловины называются характерными точками рельефа, а водораздел и тальвег – *характерными линиями рельефа*.

Очертания горизонталей, изображающих гору и котловину, лощину и хребет, похожи, поэтому для облегчения чтения рельефа на некоторых горизонталях проводят короткие черточки в направлении ската, называемые *бергштрихами*. Надписи высот горизонталей делают таким образом, чтобы основания цифр были направлены в сторону понижения местности.

Горизонталы удобны для изображения форм рельефа со сравнительно плавными изменениями высоты, но они не подходят для передачи резких изменений высот, например, обрывов, скалистых гребней, трещин, крутостенных оврагов. С помощью горизонталей невозможно показать микроформы рельефа и внесмасштабные объекты, даже если их относительная высота больше сечения рельефа.

Для преодоления этих недостатков на топографических картах применяют специальные условные знаки (рис. 19). Так, например, при изображении микроформ рельефа (кочковатых поверхностей, болотных бугров, подвижных гряд песков) указывают внешний контур микроформ и, если надо, указывают количественные характеристики этих микроформ. При изображении микроформ стремятся не только показывать границы распространения определенных форм, но и отражают закономерности их образования и размещения, например, ориентирование грядовых песков, барханов, дюн.

Выявление и правильное изображение микроформ рельефа и их динамики является одной из задач топографического дешифрирования аэро – и космических снимков. Единичные формы рельефа, не выражающиеся в масштабе карты, но имеющие значения ориентиров или являющиеся препятствиями при движении по местности, показывают внесмасштабными условными знаками. Сюда относятся скалы – останцы, валуны, курганы, пещеры, уступы, промоины, карстовые воронки. Для изображения естественных форм рельефа условным знакам присваивают коричневый цвет, а для форм, возникших в результате деятельности человека, – черный (карьеры, терриконы, дамбы, дорожные насыпи и выемки и т.д.). специальные знаки применяются для изображения динамических форм рельефа, например, барханов, оползневых склонов, растущих оврагов (см. рис. 19).

Для определения высот точек местности по горизонталям необходимо знать их высоты, поэтому подписи высот горизонталей делают так, чтобы легко можно было найти высоту любой горизонтали. Нахождение высот горизонталей облегчается, когда некоторые из них (например, пятые) утолщены.

С целью повышения наглядности изображения рельефа горизонталями применяют способ гипсометрической или послойной окраски (отмывки). При разработке шкалы послойной окраски важно, чтобы ступени шкалы (цвета и оттенки) ясно различались между собой, а расцветка всех ступеней шкалы, независимо от разнообразия красок, была гармоничной.

Шкалы гипсометрической окраски на картах масштабов 1:500 000 и 1:1 000 000 применяются в зависимости от высоты горных районов, начиная с 500 м. Отмывка горного рельефа производится при абсолютных высотах более 500 м и превышениях более 300 м, а рельефа высокогорных районов – при превышениях более 500 м.

§ 18. Топографические карты шельфа.

Топографические карты шельфа предназначаются для изучения хозяйственной эксплуатации и охраны природных ресурсов шельфа.

Карты шельфа составляют в масштабах: 1:2000; 1:5000; 1:10 000; 1:25 000; 1:100 000; 1:200 000; 1:500 000 и 1:1 000 000. карты масштабов 1:2000 – 1:10 000 предназначены для изучения небольших участков акваторий. Топографические карты шельфа могут служить основой для составления тематических карт. Для навигационных целей они не предназначены.

Топографические карты шельфы создаются в единой с топографическими картами суши проекции, системе координат и высот, имеют ту же разграфку и номенклатуру. Такое единство математической основы наиболее удобно для совместного использования топографических карт суши и рельефа, обеспечивают непрерывность картографирования шельфа с прилегающей сушей, при этом отражается общность геологического строения и геоморфологических особенностей прибрежной части суши и шельфа, как продолжения материка под водой.

Карты масштаба 1:50 000 и крупнее создаются по материалам съемочных работ: по данным систематического промера глубин, гидролокационной съемки, аэрофотосъемки мелководий. Основным видом съемочных работ для составления топографических карт шельфа является морская топографическая съемка.

Листы карты составляют в целых трапециях. Изображение прибрежной части суши переносится с топографических карт. Карты шельфа масштабов 1:100 000 и мельче составляют, используя карты более крупного масштаба. Дополнительно привлекают морские навигационные карты, материалы аэрофотосъемки и космических съемок тематические карты.

Высотная основа съемки – это реперы государственного нивелирования, пункты плановой государственной сети, сетей сгущения и точек съемочного обоснования, высоты которых определены геометрическим нивелированием, а также реперы постоянных постов наблюдения за уровнем моря, привязанные к государственной нивелирной сети.

Содержание карт шельфа пока не регламентируется единой системой обозначений, разработанной специально для этого типа карт. Основные элементы содержания карт шельфа в настоящее время: элементы математической основы, ориентиры, рельеф дна, берега, донные отложения (грунты), подводная растительность и донные организмы.

Опорные пункты и ориентиры. На картах показываются опорные пункты высотной и плановой геодезической основы, закрепленные центрами или расположенные на стационарных

средствах навигационного оборудования, а также постоянные уровенные посты. С навигационных карт наносят навигационные ориентиры, которые могут служить для привязки специальных тематических съемок.

Берега. Изображение береговой линии моря не согласовано на навигационных и топографических картах. На топографических картах береговая линия привязана к нулю Кронштадтского футштока и показывается как максимальный уровень воды во время прилива, а на навигационных картах изображается наинизший теоретический уровень моря.

Береговыми линиями водоемов называют границы суши и воды. Они подразделяются на постоянные и определенные, непостоянные и неопределенные.

Береговые линии рек показывают по урезу воды в межень. *Урез воды* – линия пересечения свободной поверхности воды с поверхностью суши. *Межень* – фаза водного режима рек, характеризующаяся устойчивыми и низкими уровнями и расходами воды, когда преобладающими и единственными источниками питания реки являются подземные воды. Береговые линии морей соответствуют линии уреза воды при наиболее высоком приливе, а при его отсутствии – линии прибоя морских волн.

В морях с приливами и отливами, а также при нагоне и сгоне воды ветром между крайними положениями береговых линий (при большой и малой воде) формируется полоса дна, осушаемая при отливе или во время нагона. Она называется *полосой осушки*.

В настоящее время при изображении береговой линии на топографических картах руководствуются следующими правилами. Очертания материков и островов, омываемых морями с величиной прилива менее 0,5 м, изображаются одной береговой линией, соответствующей урезу воды при среднем многолетнем уровне моря.

Берега, омываемые морями с величиной прилива 0,5 м и более, изображаются, при ширине осушки не менее 1,5 м, двумя береговыми линиями на карте. Из них одна соответствует урезу воды при наинизшем теоретическом уровне моря (получается по данным промера) и представляет собой границу осушки, другая, соответствующая высокому уровню из средних наблюдений, – собственно береговую линию. За южной рамкой листа карты приводятся сведения о соотношении Балтийской системы высот со средним многолетним или наинизшим возможным уровнем моря. Для приливных морей приводят обе величины.

Рельеф дна. На топографических картах шельфа он изображается горизонталями, в отличие от изобат (изолиний глубины на навигационных картах), и отметками дна в Балтийской системе высот. Особенностью и трудностью изображения рельефа дна является то, что он скрыт толщей воды различной прозрачности и плотности. Рельеф морского дна изображается по отметкам высот, полученных в результате морского и прибрежного помера (галсовой съемки). Горизонтالي проводят методом интерполяции. При выборе сечения рельефа учитывается масштаб карты, характер рельефа дна, погрешность измерения глубины на разных горизонталях. На картах шельфа изображают подробно микроформы подводного рельефа – бровки уступов, камни, скалы, рифы, мели, борозды, затопленные долины, каньоны, указывают динамические формы и их количественные характеристики.

Данные отложения (грунты). Грунты отображают сокращенными индексами: название

грунта (П - песок), цвет (бл - белый), состав и свойства грунтов (б - битый, вулк - вулканический, срд - средний и т.д.). Обследование донных грунтов производят специальными грунтодобывающими приборами. Характеристики грунта подписывают точно в местах их определения.

Дополнением содержания топографической карты шельфа является географическая характеристика, которая прилагается к выпускаемым листам. Географическая характеристика содержит сведения, которые не удалось передать на листе карты. Географическая характеристика размещается на полях карты и включает следующие разделы: положение съемочного участка относительно населенного пункта на берегу, краткое описание поверхности морского дна и особенностей форм рельефа, характеристики грунта, климатические особенности района, течения и приливо - отливные явления, ледовая обстановка в районе работ, сведения о плотности воды, явлениях свечения моря, биоресурсы моря и т.д. Топографическая карта шельфа может быть дополнена фотокартой или отдельными фотоснимками.

Топографические карты акваторий издаются в соответствии с требованиями инструкций по созданию топографических карт шельфа и внутренних водоемов, а также руководства по топографической съемке шельфа и внутренних водоемов, регламентирующих назначение, содержание и основные технические требования к топографическим картам шельфа и внутренних водоемов, состав и содержание полевых и камеральных работ по созданию таких карт, а также требования к качеству, контролю, приемке и хранению результатов съемки.

Глава 3

Задачи, решаемые по топографической карте

§ 19. Общая характеристика задач.

Топографическая карта при проектировании и эксплуатации трубопроводов является источником информации о природных и социально - экономических объектах земной поверхности (шельфа, гидрографии, дорожной сети, населенных пунктах и др.), используемой при геологических съемках, поисковых и разведочных работах, составлении схем, отчетной документации, а также в качестве основы геологических тематических карт.

Извлечение этой информации осуществляется, как правило, путем измерений по карте параметров, характеризующих взаимное расположение объектов местности и количественные характеристики отображенных явлений. Поскольку измерения сопровождаются ошибками, возникает вполне естественное желание оценить их возможное влияние на качество получаемых результатов.

К числу решаемых по топографической карте задач, позволяющих получать необходимые для инженерных исследований данные, относят следующие.

Определение географических и прямоугольных координат точек местности. В результате решения задачи получают положение искомым точек (шурфов, точек маркирующих

горизонтов, устьев и забоев скважин) в единой системе географических или прямоугольных координат с точностью, зависящей от принятого масштаба построений отчетных геологических карт. Точность получаемых координат определяется масштабом топографической карты, по которой производятся измерения; однако выбор масштаба топографической карты зависит от масштаба отчетной карты.

Определение расстояний. В результате измерений получают длину горизонтального положения между двумя точками местности, от которой можно перейти к фактическому (наклонному) расстоянию между этими точками с точностью, определяемой точностью топографической карты.

Определение направлений. В результате измерений с помощью транспортира можно определить направление линий относительно меридиана. Точность определения направления между точками по карте зависит от расстояния между ними.

Определение площади контура. Площадь контура на карте можно найти различными способами (аналитическим, графическим, механическим). При этом ошибки определения зависят в основном от применяемого способа. Площади участков, ограниченных извилистыми линиями (границы, водосборы), удобно измерять полярным планиметром.

Определение высот точек, превышений, крутизны скатов и уклонов линий. Решение этих задач возможно по горизонталям топографической карты. Точность определения зависит от точности изображения рельефа горизонталями на картах различных масштабов.

§ 20. Определение по карте географических и прямоугольных координат.

Положение в точке A в системе географических координат (φ, λ) будет определено, если будут известны широта параллели и долгота меридиана, проходящих через эту точку.

Изображение местности на отдельном листе топографической карты ограничено линиями внутренней рамки карты: параллелями – с юга и с севера, меридианами – с запада и с востока. В вершинах углов рамки подписаны их широта и долгота. Внутри листа карты линии меридианов и параллелей не нанесены. Однако их можно построить, используя специальную разграфку линий по широте и по долготе, имеющуюся за внутренней рамкой листа топографической карты (рис. 20, а).

Для определения широты (φ_1) точки A проводят по карте через одноименные минуты западной и восточной сторон рамки ближайшую к точке с юга параллель. Для определения секунд широты из точки A опускают на эту параллель перпендикуляр AA_1 (см. рис. 20, а) и измеряют его длину l в мм. Измеряют по минутной рамке отрезок параллели, соответствующий одной минуте широты – L мм. Пользуясь измеренными величинами, составляют пропорцию:

$$L, \text{ мм} - 60''$$

$$l, \text{ мм} - \Delta\varphi''$$

и определяют число секунд широты $\Delta\varphi''$:

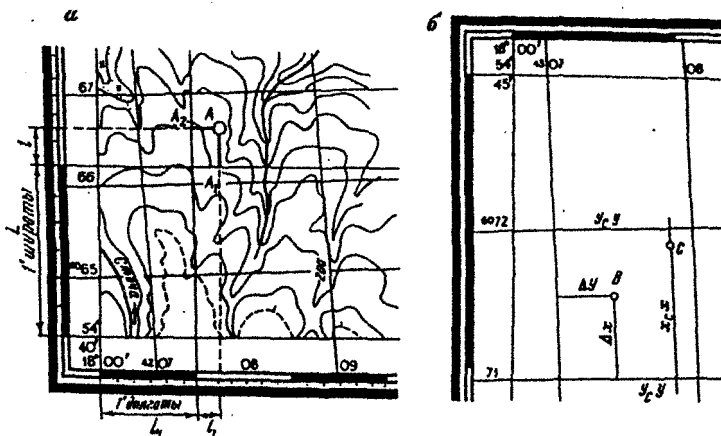


Рис. 20. К определению по карте:

а — географических координат; б — прямоугольных координат

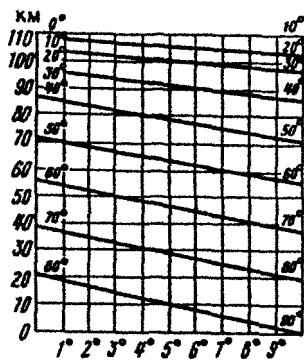


Рис. 21. График протяженности дуг параллели

$$\Delta\varphi = \frac{60'l}{L} = 0'14'', \quad (6)$$

которое надо прибавить к широте параллели для получения окончательного значения широты точки А —

$$\varphi_A = 54^\circ 41' + \Delta\varphi'' = 54^\circ 41'14''.$$

Определение долготы (λ_A) точки А выполняют в той же последовательности, проводя ближайший к точке с запада меридиан через одноименные минуты долготы северной и южной рамки, и опускают на него перпендикуляр AA_2 , длину которого l_1 (мм) сравнивают с протяженностью l' долготы L_1 (мм), получая значение

$$\Delta\lambda'' = \frac{60'l_1}{L_1}, \quad (7)$$

и окончательно

$$\lambda_A = 18^\circ 01' + \Delta\lambda'' = 18^\circ 01'12''.$$

Для того, чтобы точность определения географических координат по топографическим картам была сопоставима с точностью этих карт, расчеты по формулам (6) и (7) для карт масштабов 1:10 000 — 1:50 000 производятся с округлением до 0,1'', а для карт масштабов 1:100 000 — до 1''.

Определение прямоугольных координат. Для определения координат точки в системе плоских прямоугольных координат Гаусса — Крюгера (см. § 15) используют нанесенную на карту сетку квадратов. Вертикальные линии сетки параллельны оси абсцисс — осевому меридиану зоны, горизонтальные параллельны оси ординат — изображению экватора на плоскости. Расстояния между ближайшими линиями координатной сетки (сторона квадрата) кратны определенному числу километров на местности, поэтому сетку прямоугольных координат принято называть километровой сеткой. В масштабах 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000 сторона квадрата сетки равна 1 км, в масштабе 1:100 000 — 2 км, в масштабе 1:200 000 — 10 км. На карты масштабов 1:500 000 — 1:1 000 000 километровые сетки не наносятся. У концов (выходов) линий сетки за рамкой листа карты подписаны значения их координат в км (рис. 20, б). Значения абсцисс и преобразованных ординат (см. § 15) крайних на листе линий километровой сетки подписаны полностью (четырёхзначными числами), а промежуточные — двумя последними цифрами — десятками и единицами километров. Номер зоны в зональной системе координат приписывается слева к значению преобразованных ординат.

Для определения прямоугольных координат (x, y) точки В находят по оцифровке линий километровой сетки значения координат (в км) юго — западного угла квадрата, в котором находится точка. Опускают из точки В на южную и западную стороны квадрата перпендикуляры и измеряют их длины с точностью до 0,1 мм, которые с учетом масштаба карты выражают в метрах. Окончательное значение координат складывается из цифр подписанного на карте значения линии сетки (в км) и длины измеренного перпендикуляра (в м). При этом абсцисса точки покажет расстояние этой точки от экватора (в м), ордината — номер зоны и увеличенное на 500 км расстояние от осевого меридиана зоны (в м), так как

ордината осевого меридиана равна +500 км.

Довольно часто район исследований расположен на стыке двух зон (например, Ромашкинское месторождение), в связи с чем возникает необходимость определения прямоугольных координат в смежной *зональной системе координат*. В этом случае строят квадрат километровой сетки с определяемой точкой *C* внутри него, соединив выходы координатных линий смежной зоны, расположенные на противоположных сторонах внешней рамки карты. Относительно этого квадрата, применяя прием, описанный выше, определяют прямоугольные координаты точки *C* в системе смежной зоны.

Иногда для примерных расчетов бывает полезно знать соотношение между прямоугольными и географическими координатами. Представление о нем можно получить, воспользовавшись следующими зависимостями: известно, что 1 м, как единица длины, соответствует 1/40 000 000 части Парижского меридиана или в угловой мере $0,0324''$, следовательно, можно с некоторым приближением принять, что длина дуги меридиана в 1° соответствует 111 км. Поэтому для получения абсциссы точки по известной широте этой точки достаточно значение широты точки, выраженное в градусах, умножить на 111 км и наоборот, разделив известную абсциссу точки на 111 км, получим искомое значение широты точки в градусах.

Соотношение между ординатой точки и ее долготой гораздо сложнее, поскольку длина дуги параллели в 1° изменяется в зависимости от широты точки, через которую она проходит. Приближенное представление об этом можно получить, воспользовавшись графиком протяженности дуги параллели в 1° (рис. 21).

Для получения значения ординаты необходимо из известной долготы точки, выраженной в градусах, вычесть значение долготы осевого меридиана зоны и полученный остаток (со своим знаком) умножить на длину параллели в 1° , определенную по графику (см. рис. 21). Полученное произведение, в зависимости от знака, следует прибавить или отнять от 500 км, и к полученному результату приписать слева номер зоны.

Для определения долготы по известной ординате точки из значения ординаты вычитают 500 км и находят расстояние (со своим знаком) этой точки от осевого меридиана зоны. Полученный результат делят на длину параллели в 1° , найденную по графику, и частное от деления прибавляют (или отнимают — в зависимости от знака) к значению долготы осевого меридиана зоны.

Необходимо иметь в виду, что описанная методика позволяет получить лишь грубые, приблизительные результаты, пригодные только для общей ориентации для решения региональных задач (расстояния по графику, например, отсчитываются с ошибкой до 1 км). При проведении более детальных исследований для нахождения упомянутых зависимостей следует воспользоваться Таблицами прямоугольных координат углов, рамок, размеров рамок и площадей трапеций (М., Геодиздат, 1953).

§ 21. Определение по карте расстояний.

Как отмечалось выше, на карте изображаются не непосредственно измеренные на

физической поверхности Земли расстояния, а их проекции – горизонтальные проложения. Измерение по карте горизонтальных проложений осуществляется циркулем – измерителем, в раствор которого берется расстояние между измеряемыми точками на карте, переводимое в метры расстояний местности с помощью масштаба (численного или линейного, или поперечного). При этом выполняют следующее преобразование:

$$d' = M \cdot d,$$

где d' – горизонтальное проложение линии на местности; d – длина линии на карте, измеренная по миллиметровой шкале линейки; M – знаменатель численного масштаба карты.

Допустим, на карте масштаба 1:10 000 длина отрезка равна $d = 123,1$ мм. На местности ему будет соответствовать проложение $d' = 123,1 \text{ мм} \cdot 10\,000 = 1231 \text{ м}$.

При большом объеме работ, чтобы избежать вычислений, связанных с использованием численного масштаба (рис. 22, а), измерения ведут с помощью линейного или, если необходима высокая точность, с помощью поперечного масштаба.

Линейный масштаб изображен на рис. 22, б. Каждый отрезок линейного масштаба, равный 2 см, называется *основанием масштаба*. Подписи отрезков сделаны в соответствии с численным масштабом карты 1:25 000. Первый отрезок для повышения точности измерений разделен дополнительно на несколько частей. На рис. 22, б цена самого маленького деления равна 25 м. Длина отмеченного на этом рисунке горизонтального проложения AB линии местности равна

$$AB = 1500 + 380 = 1880 \text{ м}.$$

Поперечный масштаб изображен на рис. 22, в. основание масштаба, равное 2 см, соответствует на местности 500 м. Первое основание разделено на 10 частей, каждая часть соответствует на местности 50 м.

Горизонтальные параллельные линии делят перпендикулярно OF на 10 частей. Отрезок P_1F_1 соответствует на местности 5 м; так как $\triangle OP_1F_1$ подобен $\triangle OPF$, то

$$OF_1 = \frac{OF}{10}; \quad P_1F_1 = \frac{PF}{10} = \frac{50}{10} = 5 \text{ м}.$$

Для измерения по карте горизонтальных проложений линий местности с карты берут эту линию в раствор циркуля – измерителя; ставят его на поперечный масштаб таким образом, чтобы одна иглолка попадала на перпендикуляр справа от нуля, а другая на наклонную линию (трансверсаль) слева от нуля, причем, обе иглолки надо располагать на одной горизонтальной линии. Горизонтальное проложение линий местности AB и A_1B_1 :

$$AB = 1500 \text{ м} + 50 \text{ м} \cdot 7 + 5 \text{ м} \cdot 9 = 1895 \text{ м};$$

$$A_1B_1 = 500 \text{ м} + 50 \text{ м} \cdot 6 + 5 \text{ м} \cdot 5,5 = 827,5 \text{ м}.$$

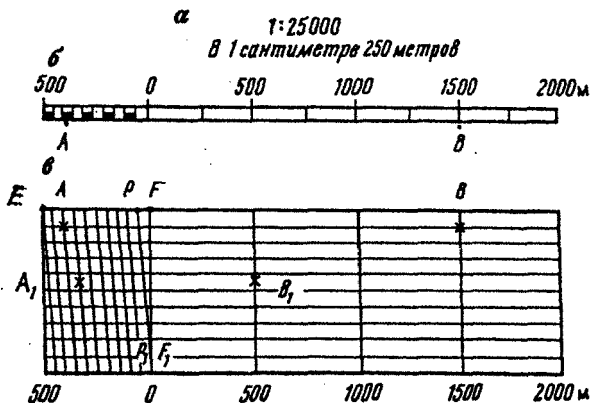
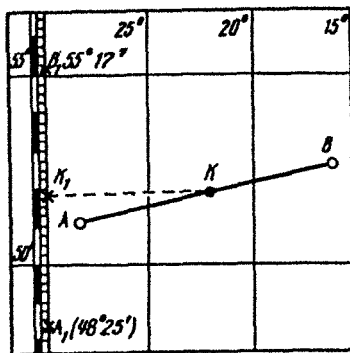


Рис. 22. Масштабы:
 α — численный; β — линейный; γ — поперечный

Рис. 23. К определению по карте расстояний в милях



Если необходимо, то по горизонтальному проложению линии d' можно определить наклонное расстояние S на местности по формуле

$$S = \frac{d'}{\cos \nu}, \quad (9)$$

где ν – угол наклона линии к горизонту.

Ошибка определения расстояния между точками по карте с помощью циркуля – измерителя и масштабной линейки зависит от точности карты и графической точности измерения.

Ошибка определения по топографической карте наклонного расстояния (с использованием формулы (9)) зависит также от ошибки определения по карте угла наклона ν , однако влияние последней будет заметно лишь для условий горной местности, в остальных случаях определяющей остается точность карты.

Следует, однако, подчеркнуть, что если положение точек на карте ошибочно, то расстояния между этими точками будут определены ошибочно независимо от способа определения.

Измерение длины криволинейных контуров (рек, извилистых участков дорог) можно выполнять с помощью курвиметра. Однако при этом результаты измерения будут очень приближенными, так как точность показаний зависит от качества бумаги карты и сцепления колесика курвиметра с бумагой. Более точные результаты можно получить при использовании для этих целей циркуля – измерителя с малым раствором (шагом). Поставив одну ножку циркуля в начальную точку, а другую на контур, начинают «шагать» по контуру, поворачивая последовательно циркуль вокруг одной из игл. Общая длина контура равна числу «шагов», умноженному на длину «шага», плюс остаток, измеренный по линейному масштабу. Если кривые плавные, то их разбивают на ряд малых отрезков, позволяющих пренебречь разницей между длиной хорды и дуги в каждом из них. Измерение криволинейного контура при этом сводится к измерению ломаной линии.

В связи с изучением морских месторождений нефти и газа может возникнуть необходимость в измерении расстояний по морским картам. На морских картах, которые строятся в проекции Меркатора, не дается линейный масштаб. Его роль выполняют восточная или западная сторона рамки карты, представляющие собой меридианы, разбитые через $1'$ по широте. У моряков расстояние оценивается обычно в милях. Морская миля – это средняя длина дуги меридиана в $1'$ по широте, равная 1852 м. Следовательно, рамки морской карты фактически разбиты на морские мили. Определив расстояние между двумя точками карты в минутах дуги меридиана, получают действительное расстояние в морских милях.

Если точки A и B , между которыми измеряется расстояние, расположены на разных меридианах (рис. 23), поступают следующим образом. Раствор циркуля, соответствующий измеряемому расстоянию, переносят на рамку так, чтобы обе иглы циркуля отстояли на

одинаковых расстояниях от концов проекций измеряемой линии. Для этого находят середину (точка K) отрезка AB и проектируют ее на боковую сторону рамки (точка K_1). От этой точки откладывают на рамке отрезки $K_1A_1 = KA$ и $K_1B_1 = KB$. Расстояние AB в милях будет равно разности отсчетов широт точек A_1 и B_1 . в нашем случае оно равно $55^{\circ}17' = 48^{\circ}25' + 6^{\circ}52' = 412'$ или 412 миль.

§ 22. Ориентирование.

Под ориентированием обычно понимают действия, позволяющие найти направление линии относительно другого направления, принятого за исходное. В геодезии исходными направлениями для ориентирования являются: истинный (географический) меридиан, магнитный меридиан и осевой меридиан зоны. В соответствии с этим углы, определяющие направление линий, называются *истинным азимутом*, *магнитным азимутом*, *дирекционным углом*.

Под *истинным азимутом* (A_1) понимают горизонтальный угол, отсчитываемый по ходу часовой стрелки от северного направления истинного меридиана до определяемого направления. Азимуты изменяются от 0 до 360° и могут быть прямыми (азимуты линии AB) и обратными (азимут линии BA). В соответствии с этим угол A_{AB} — прямой азимут AB в точке A , угол A_{BA} — обратный азимут той же линии в точке B (рис. 24, а). Линии меридианов не параллельны между собой, поэтому азимут линии, не совпадающей с меридианом в каждой точке, имеет разное значение. Угол между направлением меридианов двух данных точек называется *углом сближения меридианов* γ (в пределах зоны — угол между направлением осевого меридиана и направлением любого другого меридиана внутри этой зоны). Зависимость между прямым и обратным азимутом определяется выражением

$$A_2 = A_1 + 180^{\circ} + \gamma. \quad (10)$$

Азимуты определяются из астрономических наблюдений и с помощью гироскопических приборов.

Магнитный азимут A_m — горизонтальный угол, отсчитываемый по ходу часовой стрелки от северного направления магнитного меридиана до определяемого направления. Направление магнитного меридиана, фиксируемое магнитной стрелкой компаса, в общем случае не совпадает с направлением истинного меридиана. Поэтому магнитный азимут отличается от истинного. Отклонение магнитной стрелки компаса от направления истинного меридиана называется *магнитным склонением*. Оно может быть *восточным*, если северный конец стрелки отклоняется к востоку от географического меридиана, и *западным* — при отклонении северного конца стрелки от географического меридиана к западу. Соответственно восточное склонение положительное (+), западное — отрицательное (-). Связь между истинным и магнитным азимутами выражается уравнением

$$A_n = A_m + \delta, \quad (11)$$

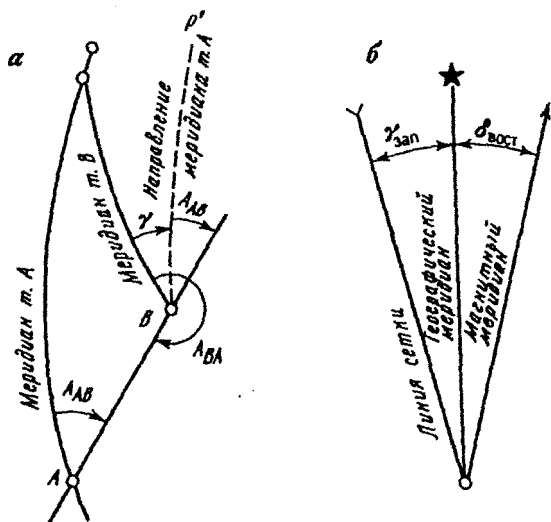


Рис. 24. К ориентированию линий:

а — прямой и обратный азимуты линий; б — график ориентирования

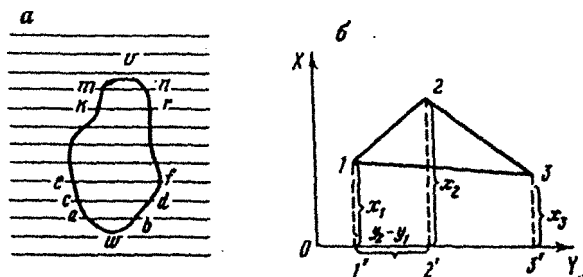


Рис. 25. К определению площадей:

а — планеткой с параллельными линиями; б — аналитическим способом

где δ - магнитное склонение (со своим знаком). Величина и знак склонения обычно указаны на графике ориентирования (рис. 24, б), помещенном под южной стороной листа топографической карты. Следует также учитывать годовое изменение склонения.

Сведения о магнитном склонении стрелки в данном районе можно получить на ближайшей метеорологической станции или в геофизических обсерваториях, а также установить по специальным картам склонений магнитного поля.

Вследствие того, что магнитное поле изменчиво, например, амплитуда только суточных изменений составляет около $15'$, магнитные азимуты определяются весьма приблизительно – до градусов или их долей, и пользоваться ими целесообразно для приближенного ориентирования на местности.

При определении направления линий по карте удобнее всего пользоваться плоскостным ориентирным углом, называемым дирекционным.

Дирекционный угол α – горизонтальный угол на плоскости, отсчитываемый по ходу часовой стрелки от северного направления осевого меридиана (или линии, ему параллельной) до определяемого направления. Связь между истинным азимутом и дирекционным углом устанавливается уравнением

$$A_{и} = \alpha + \gamma, \quad (12)$$

где γ – сближение меридианов (со своим знаком) в точке A это угол между изображениями осевого меридиана (вертикальной линии километровой сетки карты) и истинного меридиана данной точки. Угол γ для точек, расположенных к востоку от осевого меридиана, положителен (+), к западу – отрицателен (-).

Среднюю (для данного листа карты) величину и знак сближения меридианов можно определить, воспользовавшись графиком ориентирования (см. рис. 24, б).

Из уравнений связи (11) и (12):

$$A_{и} = A_{м} + \delta \quad \text{и} \quad A_{и} = \alpha + \gamma,$$

на основании равенства их левых (а следовательно, и правых) частей можно установить зависимости между всеми членами уравнений, например, из

$$A_{м} + \delta = \alpha + \gamma \quad (13)$$

следует

$$A_{м} = \alpha + \gamma - \delta \quad (14)$$

и

$$\alpha = A_m + \delta - \gamma. \quad (15)$$

Приближенное значение γ можно получить из формулы

$$\gamma_A = (\lambda_A - \lambda_{oc}) \sin \varphi_A. \quad (16)$$

Здесь λ_A и φ_A – соответственно географическая широта и долгота точки A ; λ_{oc} – долгота осевого меридиана зоны, в которой находится точка A .

Румбы – острые ориентирные углы, которыми иногда пользуются на практике вместо азимутов и дирекционных углов. Румб – острый горизонтальный угол, отсчитываемый от ближайшего (северного или южного) направления меридиана до определяемого направления.

В зависимости от названия меридиана, от которого идет отсчет, направления могут быть истинными, магнитными и просто румбами (при отсчете от осевого меридиана).

Связь между азимутами (дирекционными углами) и румбами приведена в табл.5.

Таблица 5 Связь между азимутами и румбами

Азимут (дирекционные углы), угл. Градус	Румб	Четверть и название румба
0 – 90	$r_I = A$	I - СВ
90 – 180	$r_{II} = 180^\circ - A$	II - ЮВ
180 – 270	$r_{III} = A - 180^\circ$	III - ЮЗ
270 – 360	$r_{IV} = 360^\circ - A$	IV - СЗ

Определение истинных азимутов и дирекционных углов линий по топографической карте производится измерением с помощью транспортира соответствующих ориентирных углов между направлениями истинного (или осевого) меридиана и линией, направление которой определяется. Например, для определения истинного азимута линии AB через точку A необходимо провести направление истинного меридиана; используя минутные деления северной и южной сторон рамки. Если при этом меридиан не проходит непосредственно через точку A , проводят ближайший к ней меридиан, а затем проводят через точку A линию, параллельную меридиану и считают ее меридианом точки A .

Совместив линию 0 - 180° транспортира с меридианом, проходящим через A , от его северного направления по ходу часовой стрелки до линии, направление которой определяют, отсчитывают значение угла, являющегося искомым азимутом.

Для измерения дирекционного угла линии необходимо через ее начальную точку провести линию, параллельную вертикальной линии координатной сетки, и, пользуясь транспортиром, измерить по ходу часовой стрелки от ее северного направления до определяемого направления искомым углом. Румбом этой линии будет острый угол. Так как дирекционный угол в каждой точке линии постоянен, можно воспользоваться любым пересечением линии с вертикальной

линей координатной сетки и в этой точке измерить дирекционный угол.

§ 23. Определение площадей участков местности по топографической карте.

Существует несколько способов определения площадей участков местности по топографической карте.

Графический, при котором участок на карте разбивается на ряд элементарных геометрических фигур, и по результатам измерения элементов фигур (например, высоты и основания треугольника, сторон прямоугольника и т.д.) вычисляется площадь каждой из них. Общая площадь участка равна сумме площадей всех фигур. К графическому относится также способ определения площадей палетками.

Аналитический, при котором площади участков вычисляются по координатам вершин полигонов. Эти координаты обычно определяются графически.

Механический, при котором площадь участка измеряется с помощью специального прибора – планиметра.

Возможны сочетания нескольких способов. Наибольшей точностью обладает аналитический способ. Наиболее приемлем в практике – механический.

Представляет интерес одна из разновидностей *графического способа* – определение площадей с помощью палеток. Рассмотрим ее на примере использования параллельной палетки.

Палетка с параллельными линиями (рис. 25, а) обладает определенным преимуществом при сравнении с другими типами палеток (точечной, квадратной) в связи с тем, что не требует подсчета большого количества точек или квадратов и их частей. Для определения площади участка палетку накладывают на его контур так, чтобы крайние точки v и w оказались посредине между параллельными линиями палетки (см. рис. 25, а). При этом участок расчленяется на фигуры, близкие к трапециям с одинаковыми высотами h , а линии палетки ab, cd, \dots представляют собой средние линии этих трапеций.

Общая площадь участка равна сумме площадей всех трапеций, находящихся внутри контура:

$$P = (a b h + c d h + \dots + m n h) = h(ab + cd + \dots + mn). \quad (17)$$

Сумму отрезков ab, cd, \dots определяют измерителем, для чего первый отрезок ab берут в раствор измерителя, совмещают правую иглолку измерителя с началом следующего отрезка и при неподвижной левой иглолке берут его в раствор измерителя движением правой ножки и т.д. до тех пор, пока в раствор измерителя не будут набраны все отрезки.

При *аналитическом способе* вычисления площадей используются широко известные из геометрии аналитические зависимости. Так, например, если известны координаты X, Y вершин замкнутого полигона (рис. 25, б), то его площадь может быть определена как алгебраическая сумма площадей трапеций $122'1', 233'2', 133'1'$. Удвоенная площадь трапеции равна произведению ее высоты $(y_2 - y_1)$ на сумму оснований $(x_1 + x_2)$, следовательно

$$2P = (y_2 - y_1)(x_1 + x_2) + (y_3 - y_2)(x_2 + x_3) - (y_3 - y_1)(x_1 + x_3), \quad (18)$$

после преобразования

$$P = (1/2) \{x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)\}$$

или

$$P = (1/2) [y_1(x_3 - x_2) + y_2(x_1 - x_3) + y_3(x_2 - x_1)]. \quad (19)$$

По аналогии для многоугольника с числом вершин n :

$$P = (1/2) \sum_{i=1}^n x_i (y_{i+1} - y_{i-1}) \quad (20)$$

или

$$P = (1/2) \sum_{i=1}^n y_i (x_{i-1} - x_{i+1}) \quad (21)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Для контроля вычисления площади выполняют дважды – по обеим формулам. Точность определения площади аналитическим способом зависит от точности определения координат. Если используются координаты вершин теодолитного хода, то относительная погрешность определения площади этим способом – 1:1000 – 1:2000.

Определение площадей *механическим способом* осуществляется с помощью планиметра. Широко используемый в практике полярный планиметр (рис. 26) состоит из двух рычагов – полюсного 4 и обводного 7. На конце рычага 4 укреплен груз 5 с иглой – полюсом, на другом – штифт 3 с шаровой пяткой, вставляемый в гнездо каретки 1 счетного механизма 8 обводного рычага 7. На другом конце обводного рычага находится обводной шпиль 6 или линза с нанесенной окружностью и обводной точкой, которые в процессе определения площади совмещаются с линией контура и скользят по ней. Счетный механизм состоит из счетного колеса 9, верньера 10 и счетчика целых оборотов 2.

Определение площади контура планиметром производится в следующей последовательности:

- устанавливают планиметр на карте таким образом, чтобы его полюс находился вне измеряемого контура, а обводная точка (шпиль) – в начальной (любой) точке контура;
- берут отсчет u_1 по счетному механизму. Отсчет всегда состоит из 4 цифр: 1-ая – ближайшая к указателю счетчика оборотов младшая цифра (целые тысячи делений планиметра); 2-ая и 3-ья – на счетном колесе до нулевого штриха верньера (сотни и десятки

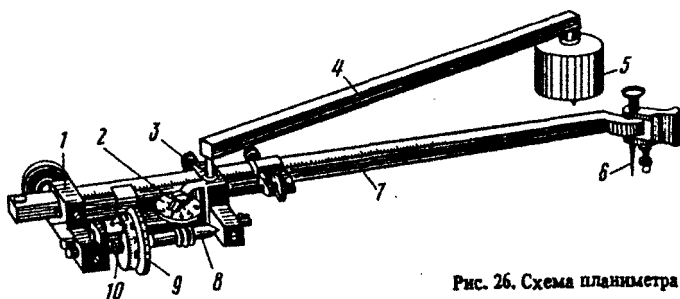


Рис. 26. Схема планиметра

Рис. 27. К определению по карте высоты:
 а — горизонтали; б — точки между
 горизонталями

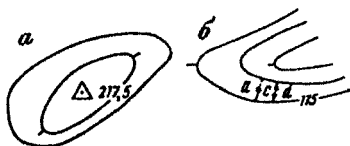
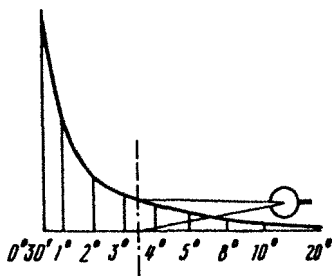


Рис. 28. График заложений для углов
 наклона местности



делений); 4-ая – номер совпадающего штриха верньера;

- обводят контур, ведя обводную точку по контуру до начальной точки, и берут второй отсчет u_2 .

Разность отсчетов $u_2 - u_1$ дает площадь контура в делениях планиметра.

Зная цену деления планиметра c (мм^2) или приведенную к масштабу карты относительную цену деления c_1 (м^2) местности, определяют площадь в квадратных миллиметрах на карте:

$$P = c(u_2 - u_1) \quad (22)$$

или в квадратных метрах на местности

$$P = c_1(u_2 - u_1). \quad (23)$$

Если полюс планиметра установить внутри контура, то по аналогии с описанным получим площадь фигуры:

$$P = c(u_2 - u) + q, \quad (24)$$

где q – постоянная планиметра, равная площади круга, описанного радиусом r , равным расстоянию от полюса до обводной точки, когда плоскость ободка счетного колеса \mathcal{P} проходит через полюс (см. рис. 26). При таком положении перемещение обводной точки по окружности указанного радиуса не вызывает вращения счетного колеса \mathcal{P} , а следовательно, и отсчета площади, т.е. площадь круга такого радиуса планиметром не учитывается.

Цену деления планиметра определяют обходом контура с заранее известной площадью:

$$c = \frac{P}{u_2 - u_1}, \quad (25)$$

где P в мм^2 .

Для этой цели можно использовать, например, квадраты километровой сетки карты, площадь которых известна. Обводят квадрат 3 раза, беря вначале и после каждого обхода отсчеты u_1, u_2, u_3, u_4 . Затем вычисляют разности $u_2 - u_1; u_3 - u_2; u_4 - u_3$, которые не должны отличаться друг от друга более чем на 3 единицы последнего знака, и вычисляют среднее арифметическое значение:

$$u_2 - u_1 = \frac{(u_2 - u_1) + (u_3 - u_2) + (u_4 - u_3)}{3}, \quad (26)$$

после чего вычисляют среднее значение цены деления:

$$c = \frac{P}{u_2 - u_1}, \quad (27)$$

где P – известная площадь квадрата километровой сетки карты.

При определении цены деления записывают длину обводного рычага R , которому она соответствует. Для удобства можно цену деления c изменить и сделать «круглой», равной, например, 10 мм^2 . для этого из пропорции $R_0 = 10 R_1/c$ находят длину рычага, соответствующую искомому «круглому» значению, и изменяют длину рычага, перемещая по нему счетный механизм на отсчет, равный R_0 .

Примеры записей определения цены деления планиметра и определения площади контура приведены в табл. 6 и 7 соответственно.

Например, для получения цены деления $c = 10 \text{ мм}^2$ необходимо изменить длину обводного рычага и сделать ее равной

$$R_0 = \frac{174,5 \cdot 10}{9,69} = 180,1 \text{ мм.}$$

Таблица 6 Определение цены деления планиметра

Отсчет	Разность отсчетов	Среднее	Площадь контура, мм ²	Цена деления планиметра	Длина рычага, мм
4225	1031		Квадрат километро- вой сетки карты	$c = 10\,000 \text{ мм}^2 / 1032 =$	
5256	1033	1032	М 1:10 000;	$= 9,69 \text{ мм}^2$	174,5
6289			100 м · 100 мм =		
	1032		10 000 мм ²		
7321					

Таблица 7 Определение площади контура

Отсчет u_1	Разность отсчетов	Среднее значение разности	Относительная цена деления для масштаба 1:10 000	Площадь, га	Длина рычага, мм
1204	732		$1 \text{ мм}^2 - 100 \text{ м}^2$	$1000 \cdot 72,7 /$	
1936	733	732,7	$10 \text{ мм}^2 - 1000 \text{ м}^2$	$/ 10\,000 = 73,27$	180,1
2669	733		$c = 1000 \text{ м}^2$		

В процессе обвода контура углы между полюсным и обводным рычагами должны быть не менее 30 и не более 150°. Для определения постоянной планиметра q обводят контур при двух положениях полюса – «полюс вне контура» и «полюс внутри контура» (размеры контура должны обеспечивать эту возможность). В соответствии с выражениями (22) и (24) площадь контура в первом случае равна $P = c(u_2 - u_1)$, во втором $P = c(u'_2 - u'_1) + q$, откуда

$$q = c(u_2 - u_1) - c(u'_2 - u'_1), \quad (28)$$

где $u_2 - u_1$ и $u'_2 - u'_1$ – разность отсчетов при полюсе вне фигуры и при полюсе внутри фигуры соответственно.

В ответственных случаях в целях контроля и повышения точности результатов измерений обводы контура выполняют при двух положениях полюса планиметра относительно счетного механизма: первый раз – при положении «полюс лево» (ПЛ), второй раз – при положении «полюс право» (ПП). Положения ПЛ и ПП относятся к фиксированному относительно обводного рычага полюсу планиметра, если смотреть вдоль обводного рычага со стороны отсчетного механизма.

Для надежности при каждом положении полюса обводы выполняют дважды – один раз по ходу часовой стрелки, второй раз – против хода.

Допускаемые расхождения между разностями отсчетов в делениях планиметра: 2 – при площади до 200 единиц; 3 – при площади от 200 до 2000 единиц; 4 – при большей площади.

При измерении участков малой площади целесообразно цену деления планиметра уменьшить в 2 - 3 раза путем изменения длины обводного рычага.

§ 24. Определение по топографической карте высот точек, крутизны скатов. Построение профиля по заданному направлению, линий заданного уклона.

Определение высоты сечения рельефа. На современных топографических картах рельеф местности изображается горизонталями. Высота сечения рельефа тесно связана с точностью масштаба карты. Невооруженным глазом на карте воспринимается отрезок в 0,2 мм, который глаз в состоянии разделить пополам. Но уже половина этого отрезка воспринимается как точка. Наименьшее расстояние на карте между двумя последовательными горизонталями (заложение) не может быть меньше 0,2 мм, следовательно, при знаменателе численного масштаба карты M , угле наклона (крутизне ската) V , разность высот между смежными горизонталями (высота сечения рельефа) h должна быть равна

$$h = 0,2 M \operatorname{tg} v. \quad (29)$$

Максимальная крутизна ската, при котором рельеф на картах изображается горизонталями, равна $v = 45^\circ$. Отсюда нормальная высота сечения рельефа, m

$$h = 0,2 M, \quad (30)$$

где M – число тысяч в знаменателе масштаба карты. Например, для карты масштаба 1:25 000 она равна $h_{25 \text{ тыс}} = 0,2 \cdot 25 = 5$ м. Высота любой горизонтали всегда кратна высоте сечения рельефа.

На топографических картах черным цветом подписывают высоты характерных точек местности: вершин, седловин, бровок и т.д. По высотам этих точек, зная высоту сечения рельефа и направление ската, можно определить высоту горизонталей. При этом следует помнить, что разность между высотой точки и высотой ближайшей к ней горизонтали всегда меньше высоты сечения рельефа (или, крайне редко, равна ей). Например, на рис. 27, а при высоте сечения рельефа $h = 5$ м изображен холм, вершина которого имеет высоту 217,5 м, следовательно, высота ближайшей к этой точке горизонтали будет равна 215.

При определении высот точек местности по горизонталям карты возможны три варианта расположения точки по отношению к горизонталям.

1. Точка находится на горизонтали. Высота этой точки, очевидно, равна высоте горизонтали.

2. Точка расположена между горизонталями (рис. 27, б) с разными высотами. Высоту точки определяют интерполированием между высотами этих горизонталей. Из рисунка видно, что

$$H_C = H_r + \Delta h = H_r + \frac{a}{d} h, \quad (31)$$

где H_C – искомая высота точки; Δh – превышение точки C над плоскостью горизонтали; a – отрезок от точки C до ближайшей к ней горизонтали; d – заложение ската; h – высота сечения рельефа; H_r – высота горизонтали.

На практике величина $\frac{a}{d} h$ оценивается на глаз.

3. Точка расположена внутри замкнутой горизонтали или между одноименными горизонталями – на седловине. Высота точки определяется приблизительно – считают, что она больше (или меньше – в зависимости от формы рельефа) высоты, ближайшей к точке горизонтали на $0,5 h$.

Для определения крутизны ската, которая характеризуется углом наклона линии местности к горизонтальной плоскости v , измеряют величину заложения d и используют выражение

$$\operatorname{tg} v = \frac{h}{d}, \quad (32)$$

где h – высота сечения, d – заложение. Угол наклона линии местности v также определяется через тангенс:

$$\operatorname{tg} v_1 = \frac{h_1}{ac}, \quad (33)$$

где ac – длина линии местности, измеренная на карте между двумя точками, превышение между которыми h_1 .

Крутизну ската можно характеризовать не углом наклона, а уклоном i , который равен

$$i = \operatorname{tg} v. \quad (34)$$

Уклон линии обычно выражают в процентах или в промилле (тысячные доли единицы); он представляет собой превышение на единицу длины. Например, если $i = 0,05$ (5%), то это значит, что на 1 м длины превышение составляет 5 см. в промилле уклон $i = 0,015$ запишется в виде 15‰.

Для определения крутизны ската обычно пользуются графиком, называемым графиком заложений, который находится под южной стороной рамки карты. В основе его построения лежит формула

$$d = h \operatorname{ctg} v. \quad (35)$$

Для построения графика на горизонтальной прямой последовательно откладывают произвольные, но равные отрезки, подписывая их цифрами градусов в порядке возрастания значений v . Из полученных точек вооставляют перпендикуляры, на которых в масштабе карты откладывают значения d , вычисленные по формуле (35) при принятой для данной карты высоте сечения рельефа. Концы перпендикуляров соединяют плавной кривой.

Для определения крутизны ската (угла наклона v) в раствор циркуля – измерителя (рис. 28) берут заложение между двумя горизонталями в интересующем направлении и переносят его на график таким образом, чтобы одна ножка измерителя была на горизонтальной линии, другая – на кривой. При этом обе ножки циркуля лежат на прямой, параллельной линиям заложений графика. Значение угла наклона определяют по надписи у горизонтальной прямой.

Построение профиля по заданному направлению. При проведении инженерных изысканий часто возникает необходимость высотной характеристики местности по какому – то определенному направлению. Удобнее всего эти сведения получить, построив по карте между точками A и B профиль местности – вертикальный разрез земной поверхности (рис. 29).

Построение начинают с того, что на линии профиля AB отмечают точки ее пересечения с характерными линиями рельефа – водоразделами, тальвегами, отмечают также точки изменения крутизны скатов, определяемые по изменению заложения горизонталей, и др. Затем линию AB , называемую *основанием профиля*, переносят на лист миллиметровой бумаги (с сохранением масштаба карты), и из отмеченных на ней точек вооставляют перпендикуляры. На перпендикулярах, в масштабе в 10 раз более крупном, чем масштаб карты, откладывают

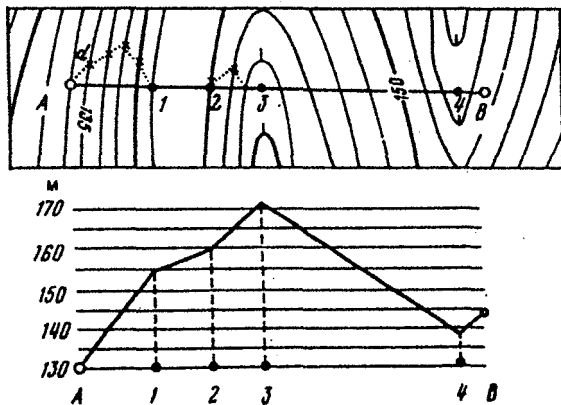


Рис. 29. К построению профиля с помощью карты

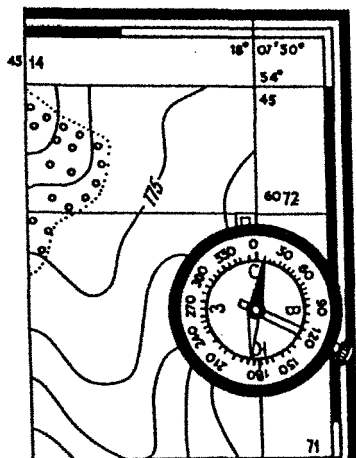


Рис. 30. Схема ориентирования карты с помощью компаса

расстояния, соответствующие высотам точек карты, нанесенным на профиль. Полученные при этом точки соединяют прямыми линиями.

Для сокращения длины перпендикуляров высоту линии основания профиля условно принимают равной не нулю, а какому – то круглому числу – условному горизонту – удобному для построения профиля (на рис. 29 – 130м).

Построение на карте линии с заданным уклоном. При выборе по карте, например, маршрута движения ставится задача, чтобы уклон линии движения не превышал определенной величины.

Эта линия прокладывается на карте с соблюдением двух требований – сохранения уклона в требуемых пределах и обеспечения наименьшей протяженности маршрута.

Сущность решения задачи сводится к определению расчетным путем заложения, соответствующего заданному уклону, и сравнению его с фактическими заложениями – расстояниями между соседними горизонталями – по линии намечаемого маршрута.

Например, на всем участке маршрута *AB* необходимо выдержать уклон, не превышающий 0,050. Заложение, соответствующее уклону $i = 0,050$, в масштабе карты 1: *M* определится из выражения:

$$d = \frac{h}{i} \frac{1}{M}, \quad (36)$$

где *h* – высота сечения рельефа; *M* – знаменатель численного масштаба карты. Например, для карты масштаба 1:25 000 заложение будет равно

$$d = \frac{5_m}{0,050} \frac{1}{25000} = 4 \text{ мм.}$$

Полученную величину заложения берут в раствор циркуля – измерителя и проверяют расстояние между горизонталями по линии *AB* (см. рис. 29). В тех местах, где расстояние между соседними горизонталями меньше вычисленного значения *d* (участки *A – 1, 2 – 3*), уклон превышает допустимый. Для уменьшения уклона изменяют направление движения и добиваются того, чтобы расстояние между горизонталями было равно *d*. Там, где расстояние между горизонталями больше *d*, уклон меньше допустимого и маршрут совпадает с направлением *AB* (участки *1 – 2, 3 – B*).

§ 25. Ориентирование на местности с помощью карты и компаса.

В ходе инженерно – геодезических изысканий для ориентирования на местности пользуются топографической картой. Во время работы карту сопоставляют с местностью с целью уточнения на местности своего положения относительно ориентиров, дорог и других местных предметов.

Ориентироваться на местности – значит определить направление «север – юг», «восток –

запад» и свое местоположение относительно окружающих местных предметов и форм рельефа. Ориентирование на незнакомой местности обычно сводится к определению расстояний, их направления и выдерживанию этого направления относительно ориентиров.

Сопоставление карты с местностью начинается с ориентирования карты, т.е. с придания ей такого положения, при котором северная сторона рамки карты становится обращенной на север, а направления линий на карте – параллельными направлениями горизонтальных проспекций соответствующих линий местности. Ориентируют карту или при помощи компаса, или по линии местности, изображенной на карте (шоссейной, железной дороге, участку реки с указанием направления течения и т.п.).

При ориентировании карты по компасу (буссоли) компас кладут на горизонтально расположенную карту и совмещают нулевой диаметр С – Ю ($0 - 180^\circ$) с западной (восточной) стороной внутренней рамки карты. После этого карту вместе с компасом поворачивают до тех пор, пока северный конец стрелки не установится на отсчете, соответствующем склонению магнитной стрелки (рис. 30), в нашем случае $+6^\circ$.

Ориентирование карты может быть выполнено и по вертикальным линиям километровой сетки. В этом случае при прокладывании нулевого диаметра ($0 - 180^\circ$) компаса к вертикальным линиям километровой сетки добиваются отклонения магнитной стрелки от нулевого деления, равного алгебраической разности величины склонения магнитной стрелки и сближения меридианов. Для облегчения работы с картой на нее можно нанести дополнительно линии магнитных меридианов и ориентировать карту с помощью компаса относительно этих линий.

Ориентирование карты по линии местности можно выполнить в том случае, если известно и на карте, и на местности какое – либо направление. Для этого становятся на местности на данной линии (например, на шоссейной дороге), приводят карту в горизонтальное положение и совмещают скошенный край визирной линейки с этим направлением. Поворачивая карту вместе с линейкой, добиваются совмещения направления на карте с направлением на местности.

В процессе ориентирования очень важно уметь определять местоположение точки своего стояния на карте. Эта задача может быть решена несколькими способами.

По ближайшим местным объектам «на глаз». Ориентируют карту и, опознав (отождествив) на ней и на местности один – два объекта, «на глаз» определяют расстояние до них и наносят на карту точку своего стояния.

Боковой засечкой. Ориентируют карту на точке стояния, находят на карте изображение (точку) хорошо видимого ориентира на местности, прикладывают к этой точке на карте визирную линейку и, поворачивая вокруг нее, направляют ребро линейки на выбранный ориентир на местности. Затем остро очиненным карандашом проводят прямую линию вдоль скошенного края линейки.

Находят второй хорошо видимый ориентир и, используя его, повторяют описанную процедуру. Проводят вторую линию, которая на пересечении с первой даст точку стояния. Угол пересечения прямых должен быть не менее 30° . При этом способе необходимо обеспечить надежную ориентировку и неподвижность карты.

При невозможности определения точки стояния приведенными методами она может быть

определена методом обратной угловой засечки по способу проф. А.П. Болотова (рис. 31), суть которого в следующем. На листе прозрачной бумаги (кальки или восковки), укрепленном на папке или планшете, наносят произвольную точку a , из которой последовательно визируют и прочерчивают направления на три видимых на местности и опознанных на карте ориентира.

Затем, сняв восковку с планшета, накладывают ее на карту так, чтобы все три прочерченные направления на ориентиры одновременно прошли через их изображения на карте. При таком положении восковки точка a будет точкой стояния. Переколов точку a на карту, получим положение точки стояния на карте (если точка a случайно окажется на окружности, проходящей через ориентиры, то решение задачи будет неопределенным). После этого можно ориентировать карту по одному из ориентиров.

Положение точки стояния может быть определено достаточно точно промерами от ближайших ориентиров одним из способов, применяемых при топографических съемках.

В настоящее время для определения местоположения с небольшой точностью широко используются бытовые приемники спутниковых систем определения координат.

Глава 4 Геодезические измерения

§ 26. Единицы измерений.

Геодезические измерения проводятся с целью определения взаимного расположения точек земной поверхности.

Они бывают линейные, угловые и высотные. По результатам измерений вычисляют координаты точек съемочного обоснования, составляют топографические планы и карты, вычерчивают планы и профили объектов нефтегазового хозяйства.

Угловые измерения выполняются с целью определения горизонтальных и вертикальных углов линий на земной поверхности и в пространстве.

Высотные измерения (нивелирование) выполняют для определения превышений и высот точек.

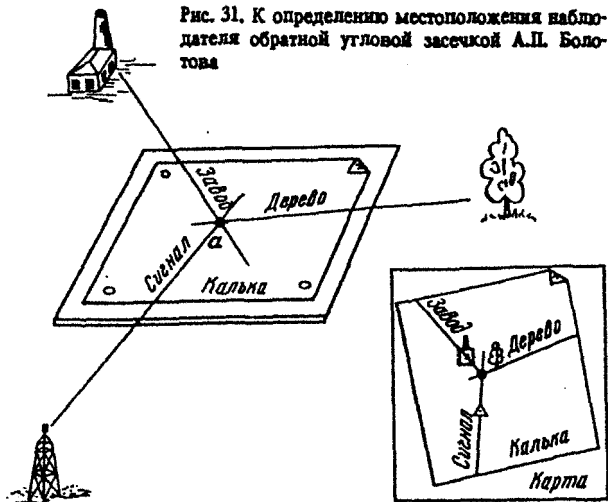
Единицы измерений

Единица линейных измерений – метр $\frac{1}{4000000}$ часть длины дуги меридиана. Введена в 1799 году по предложению Парижской Академии Наук. В 1960 на XI Генеральной конференции по мерам и весам принято новое определение метра: длина равна $1650763,73$ длины волны излучения в вакууме, соответствующего переходу между уровнями $2p^{10}$ и $2d^5$, атома криптона – 86.

Единицы угловых измерений – окружность и ее доли.

$$\text{Градус} \quad 1^\circ = \frac{10\text{кр}}{360}; \quad 1' = \frac{1^\circ}{60}; \quad 1'' = \frac{1'}{60}.$$

Рис. 31. К определению местоположения наблюдателя обратной угловой засечкой А.П. Болотова



Град (предложена Парижской Академией Наук в 1799 году)

$$1^{\circ} = \frac{10^{\text{кр}}}{400}; \quad 1' = \frac{1^{\circ}}{100}; \quad 1'' = \frac{1'}{100}.$$

Радян – центральный угол, опирающийся на дугу окружности, длина которой равна ее радиусу

$$\rho = 57,2958^{\circ} = 3437,75' = 206264,8''.$$

В России угломерные приборы выпускают с градусной оцифровкой кругов, в некоторых странах выпускаются приборы с оцифровкой кругов в градах.

§ 27. Измерение и построение углов.

Стороны угла на местности AB и BC (рис. 32, *а*) в общем случае не лежат в горизонтальной плоскости. Для измерения горизонтального угла через стороны AB и BC проведем вертикальные плоскости P и P_1 , пересекающиеся по отвесной линии ZZ_1 . Следы пересечения этих плоскостей с горизонтальной плоскостью Q образуют горизонтальный угол $abc = \beta$. Если в горизонтальной плоскости расположен круг с делениями, возрастающими по ходу часовой стрелки, то величина угла β (рис. 32, *б*) равна разности отсчетов по кругу в точках c_1 и a_1 . (Центр круга совмещен с линией ZZ_1).

На рис. 33 приведена схема устройства угломерного прибора, называемого теодолитом. Одной из основных его частей является круг с делением – лимб. Во время измерения угла плоскость лимба приводится в горизонтальное положение, а центр – устанавливается по отвесной линии, проходящей через вершину измеряемого угла.

Проектирующая плоскость образуется в теодолите вращением визирной оси зрительной трубы IV вокруг ее горизонтальной оси HH . Эта плоскость, называемая *коллимационной*, при измерении угла должна быть отвесной – перпендикулярной к плоскости лимба. Ось уровня $ии_1$ должна быть перпендикулярна к вертикальной оси ZZ_1 . Винт 10 называется закрепительным винтом трубы, а винт 11 – наводящим винтом трубы.

Ось вращения трубы – горизонтальная ось теодолита HH – вращается в двух подставках, укрепленных на алидадном круге (алидаде) 7 . Алидадный круг может вращаться вокруг вертикальной оси ZZ_1 . Алидада имеет закрепительный 5 и наводящий 4 винты. В процессе измерения горизонтального угла лимб неподвижен. Однако для производства некоторых работ необходимо, чтобы лимб поворачивался, поэтому у лимба также есть закрепительный 14 и наводящий 13 винты.

Вертикальная ось теодолита устанавливается в отвесное положение (а плоскость лимба в горизонтальное положение) по цилиндрическому уровню 12 вращением подъемных винтов 3 (всего 3 винта).

Теодолит устанавливается на штативе 15 и закрепляется на нем станковым винтом 2 .

Центрирование теодолита, т.е. установка теодолита так, чтобы его вертикальная ось

Рис. 33. Схема устройства теодолита

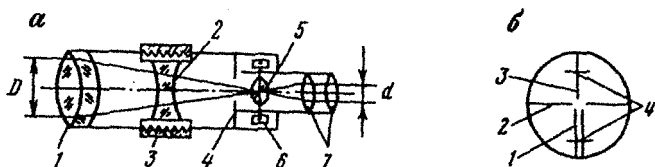
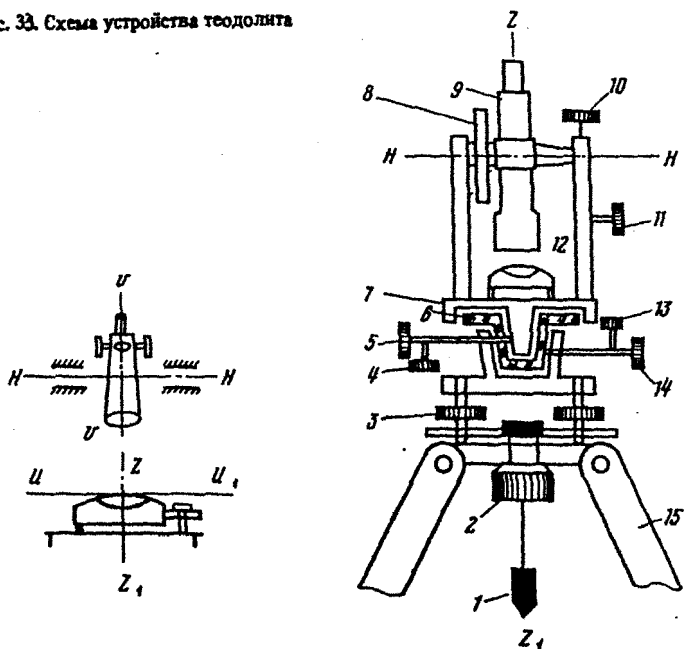


Рис. 34. Устройство зрительной трубы:
 а — схема зрительной трубы; б — сетка штрихов

проходила через вершину измеряемого угла, осуществляется с помощью отвеса 1 (или для теодолита ТЗ0 при помощи зрительной трубы, направленной вертикально вниз).

Для измерения углов наклона (вертикальных углов) теодолит имеет вертикальный круг 8.

В процессе измерения горизонтального угла вращением алидады 7 и трубы 9 последовательно наводят зрительную трубу на точки А и С местности и берут с помощью отсчетного устройства (на рис. 33 оно не показано) отсчеты по лимбу 6. разность этих отсчетов и есть значение горизонтального угла.

Зрительная труба

Для визирования на удаленные предметы в геодезических приборах применяют зрительные трубы. Иногда используют трубы с обратным изображением, иногда – с прямым изображением.

Зрительная труба на рис. 34. а имеет объектив 1, фокусирующую линзу 2, которая перемещается с помощью кремальеры 3. Лучи, идущие от наблюдаемого объекта, ограничиваются диафрагмой 4 и фокусируются в плоскости сетки нитей 5, затем они поступают в окуляр 7. Сетка нитей выполнена в виде штрихов на стеклянной пластинке и закреплена в трубе юстировочными винтами 6. На рис. 34б изображена сетка штрихов: 2 и 3 – соответственно горизонтальный и вертикальный штрихи, 1 – биссектор, 4 – дальномерные штрихи.

Воображаемая линия, соединяющая оптический центр объектива и перекрестье сетки нитей, называется *визирной осью* трубы.

Для подготовки трубы к наблюдениям устанавливают трубу «по глазу» - наводят трубу на светлый фон и поворачивают окулярное колечко, добиваясь четкого изображения штрихов сетки. Устанавливают трубу «по предмету» - наводят трубу на предмет и, вращая кремальеру, добиваются четкого изображения предмета. При перемещении глаза у окуляра перекрестье сетки не должно сходить с изображения наблюдаемой цели. В противном случае имеет место параллакс сетки нитей, который возникает вследствие того, что плоскость изображения не совпадает с плоскостью сетки. Параллакс устраняется небольшими поворотами кремальеры и окулярного кольца.

Некоторые характеристики зрительной трубы. Видимым или угловым увеличением зрительной трубы называется отношение угла β , под которым изображение рассматриваемого предмета видно в трубу, к углу α , под которым предмет виден невооруженным глазом, т.е.

$$\Gamma = \frac{\beta}{\alpha} \quad \text{или} \quad \Gamma = \frac{f_{об}}{f_{ок}},$$

где $f_{об}$ – фокусное расстояние объектива; $f_{ок}$ – фокусное расстояние окуляра.

Увеличение зрительной трубы можно определять также по формуле

$$\Gamma = \frac{D}{d},$$

где D – диаметр входного отверстия объектива; d – диаметр выходного отверстия трубы.

Считается, что погрешность визирования невооруженным глазом равна $1'$. Погрешность визирования через зрительную трубу m_v уменьшается пропорционально увеличению трубы

$$m_v = \frac{60''}{\Gamma}.$$

Для технических теодолитов $\Gamma = 20''$, $m_v = 3''$.

Поле зрения трубы называется пространство, видимое в трубу при неподвижном ее положении. Оно ограничивается диаметром диафрагмы трубы. Угол поля зрения трубы ε (в угл. градусах) можно определить по формуле

$$\varepsilon = \frac{38,2^\circ}{\Gamma}.$$

Чем больше увеличение трубы, тем меньше угол поля зрения. Для зрительной трубы, увеличение которой $\Gamma = 20''$, угол поля зрения $\varepsilon \approx 2^\circ$.

Проверки теодолита

Для получения правильных результатов измерений в теодолите должны соблюдаться определенные геометрические условия. Наличие этих условий выявляют в результате поверки прибора. Если выясняется, что то или другое геометрическое условие не выполняется, производят юстировку (регулировку) прибора. Выполняют следующие проверки.

1. *Ось цилиндрического уровня горизонтального круга должна быть перпендикулярна к вертикальной оси теодолита, т.е. должно соблюдаться условие $UU_1 \perp ZZ_1$ (см. рис. 33).*

Поворотом алидады устанавливают цилиндрический уровень параллельно линии, соединяющей два подъемных винта, и приводят ими пузырек уровня в нуль – пункт. Затем поворачивают алидаду с уровнем на 180° . Если после поворота пузырек уровня остался в нуль – пункте или отклонился не более одного деления, то условие выполнено. При смещении пузырька более чем на одно деление юстировочными винтами уровня перемещают его пузырек по направлению к нуль – пункту на половину дуги отклонения.

Перед выполнением следующих проверок необходимо привести вертикальную ось теодолита в отвесное положение. Уровень устанавливают по направлению двух подъемных винтов и вращением их в разные стороны приводят пузырек уровня в нуль – пункт. Затем поворачивают алидаду на 90° и третьим подъемным винтом приводят пузырек на середину алидады. Эти действия повторяют до тех пор, пока пузырек не будет оставаться на середине алидады при любом положении алидады (допускается отклонение до одного деления).

2. *Визирная ось должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси теодолита (оси вращения трубы), т.е. требуется выполнение условия $VV \perp HH$.*

Если указанное условие выполняется, то при вращении трубы вокруг горизонтальной оси визирная ось описывает плоскость, называемую коллимационной. В случае несоблюдения условия визирная ось описывает не плоскость, а две конические поверхности. Угол отклонения визирной оси от перпендикуляра называется *коллимационной ошибкой*.

Для проверки данного условия выбирают удаленный ясно видимый предмет и визируют на него при положении вертикального круга справа (КП) от окуляра, берут отсчет по лимбу E_1 , затем визируют на эту же точку при круге лево (КЛ), берут отсчет E_2 .

Вычисляют коллимационную ошибку по формуле

$$c = \frac{E_2 - E_1 \pm 180^\circ}{2}$$

Если она не превышает двойной точности отсчитывания по лимбу (для теодолита Т30 не более 2'), то условие считается выполненным. Если же превышает – то производят юстировку. Вычисляют правильный отсчет по формуле

$$E = \frac{E_1 + E_2 - 180^\circ}{2}$$

Поворотом алидады устанавливают этот отсчет на лимбе горизонтального круга. При этом перекрестье сетки нитей сместится с изображения наблюдаемой точки. Ослабляют вертикальные юстировочные винты сетки и, действуя боковыми юстировочными винтами, передвигают перекрестье сетки до совмещения его с наблюдаемой точкой. После юстировки рекомендуется повторить проверку.

3. *Горизонтальная ось должна быть перпендикулярна к вертикальной оси теодолита – условие $HH \perp ZZ_1$.* Соблюдение этого условия необходимо для того, чтобы в ходе измерения горизонтального угла коллимационная плоскость занимала отвесное положение.

Для проверки данного условия теодолит устанавливается на расстоянии 10 -20 м от стены здания. Выбирают на стене высоко расположенную точку M и наводят на нее трубу. Затем проецируют точку M вниз до уровня, близкого к уровню горизонтальной оси теодолита, и отмечают на стене проекцию точки M' . При втором положении вертикального круга повторяют эти же действия и получают вторую проекцию точки M'' . Допускается несовпадение точек M' и M'' в пределах полоски биссектора. Юстировка выполняется в заводских условиях или в специализированных мастерских. Следует иметь в виду, что среднее из отсчетов по лимбу, взятых при наведении на точку при двух положениях трубы (КП и КЛ), свободно от влияния наклона оси вращения трубы.

4. *Проверка сетки нитей – вертикальный штрих сетки нитей должен располагаться в коллимационной плоскости трубы, или иначе, горизонтальный штрих сетки нитей должен быть перпендикулярным к оси вращения теодолита.*

Наводят перекрестье сетки нитей на ясно видимую точку. Поворачивая алидаду наводящим винтом, наблюдают за положением точки. Если изображение точки остается на среднем горизонтальном штрихе сетки – условие выполнено. Для юстировки открепляют винты сетки и соответствующим образом поворачивают ее, после чего винты закрепляют, а оверку повторяют.

Если производилась юстировка (поворот) сетки, то после этой проверки необходимо повторить проверку перпендикулярности визирной оси к горизонтальной оси теодолита.

Измерение горизонтального угла

Измерение начинают с того, что теодолит закрепляют на штативе и центрируют над точкой с помощью отвеса (нитяного или оптического). Подъемными винтами приводят вертикальную ось теодолита в отвесное положение, закрепляют лимб. Подготавливают трубу для наблюдений. Затем наводят трубу на точки (вращается алидада), отсчитывают по лимбу, вычисляют значение угла. Рассмотрим два способа измерения горизонтальных углов.

Способ приемов, первый полуприем. При неподвижном лимбе, поворачивая алидаду, визируют на точку A (см. рис. 32) и получают отсчет по лимбу a_1 , наблюдают на точку c и получают отсчет c_1 , вычисляют значение угла β из первого полуприема $\beta = c_1 - a_1$.

Второй полуприем. Переводят трубу через зенит и, поворачивая алидаду, наблюдают вначале на точку C , получают отсчет c_2 , а затем на точку A , получают отсчет a_2 , значение угла из второго полуприема

$$\beta' = c_2 - a_2.$$

Если расхождение между β и β' не превышает двойной точности отсчитывания, вычисляют среднее значение измеренного угла

$$\beta_{\text{ср}} = \frac{\beta + \beta'}{2}.$$

В противном случае повторяют измерения, предварительно повернув и закрепив в другом положении лимб.

Способ круговых приемов

Данный способ применяется, когда наблюдаемых направлений больше трех. Для облегчения вычислений устанавливают лимб теодолита так, чтобы отсчет по первому направлению a_1 был близок к нулю, затем при закрепленном лимбе визируют на точки и записывают отсчеты a_1, a_2, \dots, a_n , а в конце для контроля еще раз наводят на первую точку.

Во втором полуприеме трубу переводят через зенит и визируют на все направления в обратном порядке – против хода часовой стрелки. Значения направлений в полуприемах вычисляют относительно первого направления, принимая первое за нулевое (из всех отсчетов вычитают отсчет a_1). Затем вычисляют средние значения направлений из полуприемов. Расхождения значений направлений в полуприемах допускаются в пределах двойной точности отсчитывания.

Построение на местности заданного горизонтального угла

Построение проектного угла выполняют следующим образом (рис. 35). Устанавливают в известной и закрепленной на местности точке B теодолит. Визируют при КП на закрепленную на местности точку A , получают отсчет a , прибавляют к нему значение заданного угла и получают отсчет c' , который вращением алидады устанавливают на горизонтальном круге. Визируют в трубу и закрепляют на местности точку C' . Указанные действия повторяют при КЛ, отмечают на местности положение точки C'' . Расстояние $C'C''$ делят пополам и получают точку C , фиксирующую построенный угол. Для контроля измеряют угол ABC и сравнивают его с

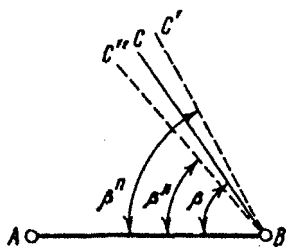


Рис. 35

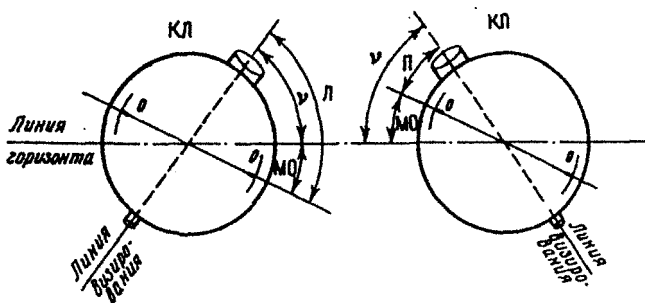


Рис. 36 Схема измерения угла наклона

заданным углом.

Измерение углов наклона

Углом наклона v называется угол между горизонтальной плоскостью и направлением визирной оси зрительной трубы. Угол наклона может быть положительным, если наблюдаемая точка находится над горизонтальной плоскостью, и отрицательным, если точка лежит ниже нее.

Для измерения углов наклона применяется градуированный вертикальный круг и отсчетное приспособление. Вертикальный круг жестко скреплен с горизонтальной осью зрительной трубы и поэтому поворачивается вместе с трубой. При измерениях горизонтальная нить сетки нитей совмещается с наблюдаемой точкой, ось цилиндрического уровня приводится в горизонтальное положение. При этом линия, относительно которой берется отсчет, будет занимать определенное, но не обязательно горизонтальное, положение. Казалось бы, что при приведении оси уровня в горизонтальное положение отсчет по вертикальному уровню должен быть равен нулю, поскольку отсчет вертикального угла ведется от горизонтальной плоскости. Однако в силу разного рода причин этого не происходит, и отсчет по вертикальному кругу при горизонтальном положении визирной оси и оси уровня отличается от нуля. Так же, как и в ряде физических приборов, может иметь место так называемый «нулевой отсчет» - положение, при котором стрелка прибора еще до начала измерений устанавливается не на нуле, а на какой-то другой цифре. Этот «нулевой отсчет» в геодезии называют место нуля (МО). Его необходимо учитывать, как поправку к отсчетам, при измерении вертикальных углов. Так, например, для теодолита Т30 угол наклона визирной оси трубы и отсчет Л по вертикальному кругу при КП связаны (рис. 36) соотношением

$$v = Л - МО. \quad (37)$$

Связь между углом наклона v и отсчетом П при КП будет следующей для теодолита Т30:

$$v = 360^\circ - (П + 180^\circ) + МО = МО - (П + 180^\circ). \quad (38)$$

У теодолита Т30 деления на вертикальном круге возрастают против хода часовой стрелки, поэтому к отсчету при КП добавляют 180° .

Решив эти два уравнения относительно v и МО, получим:

$$v = \frac{Л - П - 180^\circ}{2} \quad (39)$$

и

$$МО = \frac{Л + П + 180^\circ}{2}. \quad (40)$$

Из формулы (37) следует, что при $MO = 0$ отсчеты по вертикальному кругу соответствуют измеряемым углам наклона. Следовательно, место нуля – это отсчет по вертикальному кругу теодолита при горизонтальном положении визирной оси зрительной трубы и оси уровня.

В зависимости от оцифровки вертикального круга теодолитов разных моделей формулы (39) и (40) несколько изменяются; они приведены в паспорте каждого прибора.

При визировании на точки с разными высотами место нуля должно оставаться постоянным. Постоянство MO служит контролем правильности измерений.

Проверка постоянства MO производится следующим образом. Визируют на несколько различно удаленных от прибора местных предметов при КП и КЛ, и по полученным при этом отсчетам по вертикальному кругу вычисляют значения места нуля по формуле (40). Полученные результаты должны быть одинаковыми в пределах двойной точности отсчетного приспособления.

Вычисления углов наклона по формуле (37) можно упростить, если значение места нуля равно или близко к 0.

Для приведения места нуля к нулю в теодолите Т30 после определения значения места нуля при положении КЛ устанавливают на вертикальном круге значение угла наклона, вычисленное по формуле (37). В результате горизонтальная нить сетки сместится с наблюдаемого предмета. Действуя вертикальными исправительными винтами сетки нитей, совмещают среднюю нить сетки с изображением наблюдаемого предмета. После исправления значения места нуля определяют его вновь и если необходимо, исправляют повторно.

§ 28. Приборы для угловых измерений

Угловые измерения выполняют теодолитом. Теодолит – это прибор для измерения горизонтальных и вертикальных углов. Теодолиты различаются по точности и по конструкции.

По точности различают: высокоточные Т05, Т1; точные Т2, Т5, технические Т15, Т30. Цифры показывают среднюю квадратическую ошибку измерения угла одним приемом в секундах.

По конструкции различают теодолиты оптические, электронные и лазерные. В оптических теодолитах отсчеты по угломерным кругам выполняются наблюдателем. В электронных теодолитах на угломерных кругах нанесен штрих – код, отсчет считывается фотоэлементом, а значение отсчета появляется в цифровом виде на экране перед наблюдателем. Кроме того, при измерении вертикальных углов (углов наклона) для задания линии горизонта в одних конструкциях используется уровень, а в других компенсатор (маятниковое устройство).

В некоторых типах электронных теодолитов имеется встроенный в оптическую систему лазер, которым пользуются в ходе разбивочных работ. В таблице 8 приведены основные характеристики некоторых современных теодолитов.

Таблица 8

Технические характеристики	Фирма и модель					
	LDT50 "SOKKIA"	DT510 "SOKKIA"	ЗТ2КП УОМЗ	ЗТКП УОМЗ	4Т15П УОМЗ	4Т30П УОМЗ
Тип теодолита	электронный	электронный	оптический	оптический	оптический	оптический
Увеличение крат	30	30	30	30	20	20
Средняя квадратич. ошибка измерения угла одним приемом (сек)	5	5	2	5	20	15
Компенсатор диап- зон (мин)	±3 двухосевой	±3 двухосевой	4	4	нет	нет
Дисплей	4 строки × 20 символов два экрана	2 строки × 8 символов два экрана				
Наличие лазера	да	нет	нет	нет	нет	нет
Вес, кг	5,7	4,7	4,7	4,7	3,5 в футляре	3,5 в футляре
Гарантийный срок	2 года	2 года	2 года	2 года	2 года	2 года

§ 29. Линейные измерения

Измерения длин линий выполняются приборами механическими, физико – оптическими и электромагнитными.

Механические мерные приборы. К ним относятся жезлы, инварные проволоки, ленты и рулетки. Точность измерения линий указанными приборами характеризуется относительными ошибками соответственно $\frac{1}{1000000}$; $\frac{1}{10000}$ – $\frac{1}{50000}$ (до $\frac{1}{1000000}$); $\frac{1}{1000}$ – $\frac{1}{5000}$ (до $\frac{1}{10000}$).

В измерениях для технических целей чаще всего применяют ленты 20 – и 24 – метровой длины и рулетки длиной 10, 20, 30 и 50 м.

Перед началом работ производят компарирование мерного прибора, то есть сравнение его с контрольным мерным прибором. В результате сравнения узнают поправку за компарирование, которую учитывают при измерениях.

На местности конечные точки измеряемых линий закрепляют в зависимости от срока и важности работ деревянными кольями, металлическими штырями или бетонными монолитами.

В отворе линии (вертикальной плоскости, проходящей через конечные точки линии) выставляют вехи (на равнине примерно через 100 м, а в пересеченной местности – в пределах прямой видимости). Вешение выполняют на глаз, в некоторых случаях при помощи теодолита, устанавливая вехи от дальнего конца линии «на себя». Для вычисления горизонтальных проложений измеряют углы наклона местности. Линию измеряют дважды – в прямом и обратном направлениях. Длина линии определяется по формуле

$$D = l \cdot n + r,$$

где l – длина мерного прибора,

n – число уложений мерного прибора в измеряемой линии,

r – остаток.

Горизонтальные проложения вычисляют по известной формуле

$$d = D \cos \nu$$

(ν – угол наклона местности).

Точность измерения линий мерной лентой в зависимости от условий характеризуется относительными ошибками (1/1000 – 1/3000).

Оптические дальномеры. В основу определения расстояния оптическими дальномерами положено решение параллактического треугольника AMC (рис. 37), в котором φ – параллактический угол, σ – база, D – определяемое расстояние. Из рис. 37 следует:

$$D = \frac{\sigma}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}$$

Учитывая, что угол φ мал (обычно не превышает 1°), можно записать:

$$D = \frac{\sigma \rho}{\varphi},$$

где ρ – радиан.

В зависимости от решения параллактического треугольника различают следующие типы оптических дальномеров:

- с постоянным параллактическим углом и измеряемой базой;
- с постоянной базой и измеряемым параллактическим углом;
- с измеряемым углом и измеряемой базой.

Нитяной дальномер. Нитяной дальномер относится к дальномерам с постоянным параллактическим углом и измеряемой базой. Он имеется в зрительных трубах большинства геодезических приборов и представляет собой (рис. 38) штрихи сетки: верхний a и нижний σ , обеспечивающие постоянный параллактический угол. Для измерения расстояния на одном конце линии устанавливают прибор, а на другом – дальномерную рейку. На рис. 38 приведена схема нитяного дальномера. Лучи от штрихов a и σ проходят через объектив, пересекаются в переднем фокусе объектива F и пересекают рейку в точках A и B . Расстояние между точками B и A (база) есть разность отсчетов по дальномерным штрихам, обозначается через n . Длину измеряемой линии можно определить из выражения

$$D = D' + f + \delta, \quad (42)$$

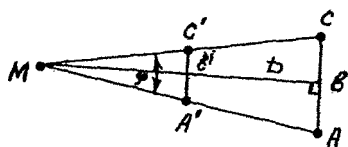


Рис. 37

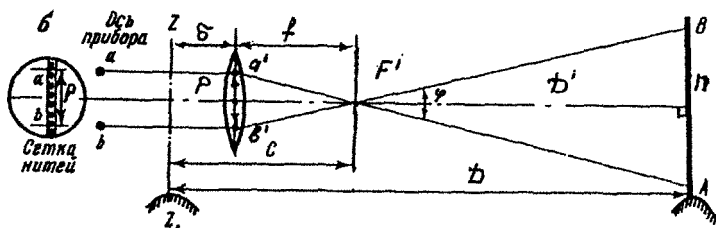
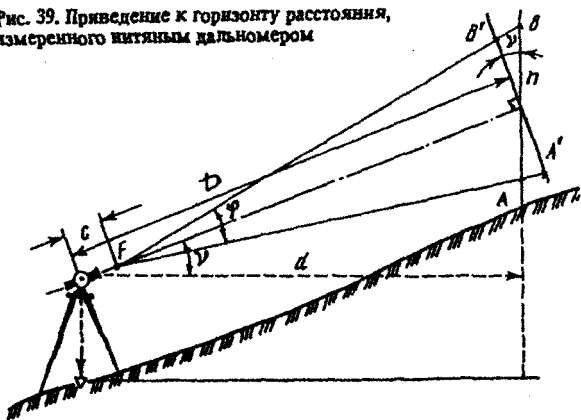


Рис. 38

Рис. 39. Приведение к горизонту расстояния, измеренного нитяным дальномером



где D' - расстояние от точки F' до рейки,

f - переднее фокусное расстояние объектива,

δ - расстояние от объектива до вертикальной оси вращения прибора.

Из подобия треугольников ABF' $a'b'F'$ можно записать

$$\frac{D'}{n} = \frac{f}{p} \quad \text{или} \quad D' = \frac{f}{p} \cdot n,$$

$$p = a'b'$$

где p - расстояние между дальномерными штрихами.

Обозначим через $k = \frac{f}{p}$ - коэффициент дальномера и через $c = (f + \delta)$ - постоянную поправку дальномера, тогда

$$D = k \cdot n + c.$$

В современных геодезических приборах $k = 100$ и $c \approx 0$.

Это удобно при измерениях -- отсчет по рейке в сантиметрах легко переводить в метры расстояния.

Измерения линий нитяным дальномером выполняются с относительной ошибкой $1/100 - 1/300$.

Приведение к горизонту расстояний, измеренных нитяным дальномером. При измерениях на местности расстояний нитяным дальномером (рис. 39) необходимо учитывать угол наклона (практически при углах наклона более 2°).

При визировании на рейку (рис. 39) получается отсчет $n = AB$. Для определения наклонного расстояния D необходимо, чтобы рейка располагалась под прямым углом к визирной оси. В этом положении отсчет по рейке будет равен $n' = A'B'$. Но из рис. 39 следует

$$n' = n \cdot \cos \nu \quad \text{откуда} \quad D = n' \cdot k + c \quad \text{и} \quad D = n \cdot k \cdot \cos \nu + c.$$

Горизонтальное положение определяется по формуле

$$d = D \cdot \cos \nu \quad \text{или} \quad d = n \cdot k \cdot \cos^2 \nu + c \cdot \cos \nu. \quad (43)$$

Если значение c близко к нулю, то горизонтальное положение линий, измеряемых нитяным дальномером, можно определять по формуле

$$d = n \cdot k \cdot \cos^2 \nu.$$

Электромагнитные дальномеры. Под электромагнитными дальномерами подразумевают приборы для измерения расстояния по времени распространения электромагнитных колебаний между конечными точками линии.

В зависимости от используемого диапазона электромагнитных колебаний различают светодальномеры и радиодальномеры. В зависимости от характера электромагнитного излучения различают импульсные и фазовые дальномеры.

Импульсный дальномер работает следующим образом. На одном конце измеряемой линии устанавливается дальномер, а на другом отражатель (рис. 40а). В дальномере имеется передатчик, приемник и индикатор времени. Передатчик излучает электромагнитный импульс (радио или световой) в направлении отражателя. Импульс после отражения возвращается в приемник. Индикатор времени измеряет время t прохождения импульса по дистанции туда и обратно. Расстояние определяют по формуле

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t, \quad (44)$$

в которой c – скорость распространения электромагнитных колебаний в атмосфере, определяемая по формуле

$$c = \frac{c_0}{n},$$

где c_0 – скорость распространения электромагнитных колебаний в вакууме, равная 299792458 м/с.

n – показатель преломления воздуха.

Импульсные дальномеры применяют при аэрофотосъемке, как высотомеры, для определения высоты полета в момент фотографирования. При измерениях отражателем импульсов является поверхность земли. Ошибка определения высоты радиовысотомерами в равнинных районах около 1 – 2 м. В горной местности радиовысотомеры не применяют из-за больших ошибок определения высоты, возникающих вследствие отражения радиоволн не от точки, над которой находится самолет, а от ближайших к нему вершин.

Схема фазового светодальномера приведена на рис. 40б. В этом дальномере время распространения электромагнитных колебаний по дистанции и обратно t измеряется косвенно, после сравнения фазы непрерывных колебаний, уходящих на дистанцию и возвращающихся после отражения.

Передатчик дальномера излучает в направлении отражателя свет, модулированный по амплитуде частотой f . После отражения эти колебания поступают в приемник.

На фазометре сравнивается фаза сигнала, уходящего на дистанцию, φ_1 , и фаза сигнала, приходящего с дистанции, φ_2 .

Фаза уходящего на дистанцию сигнала равна

$$\varphi_1 = \omega t + \varphi_0$$

где φ_0 и φ_1 – фазы гармонического колебания в начальный момент и момент времени t ,

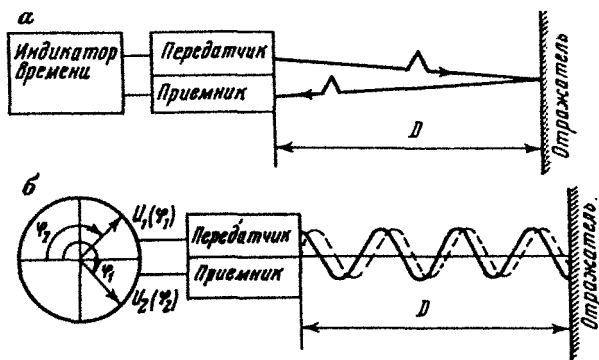


Рис. 40. Схемы измерений расстояния дальномером:
 а — импульсный; б — фазовый

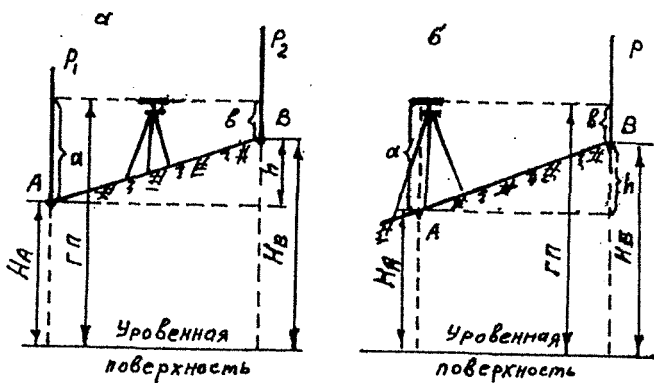


Рис. 41

ω – угловая частота колебаний. Известно, что $\omega = 2\pi / T = 2\pi f$. Следовательно,

$$\varphi_1 = 2\pi f t + \varphi_0.$$

Фаза сигнала, приходящего с дистанции, определяется выражением

$$\varphi_2 = 2\pi f (t - \tau) + \varphi_0.$$

Разность фаз этих колебаний, определяемая по фазометру, равна

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi f \tau, \quad \text{откуда } \tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}.$$

При известном значении τ расстояние D определяют по формуле (44).

Имеется одна особенность фазового дальномера. Разность фаз в общем случае состоит из целого числа периодов N и доли периода $\Delta\varphi$. Величину $\Delta\varphi$ определяют по фазометру в пределах одного периода. За время, равное одному периоду, колебание распространяется на расстояние, равное длине волны $\lambda = cT$. Следовательно, по $\Delta\varphi$ однозначно можно определить расстояние, не превышающее $1/2 \lambda$. Для определения N выполняют измерения на нескольких частотах. Сначала на низкой частоте определяют приближенное расстояние в пределах $\frac{1}{2} \lambda$, затем уточняют его на более высоких частотах (число периодов будет известно). Обычно хватает измерений на трех частотах. Применяемые частоты модуляции лежат в диапазоне от 10 до 40 МГц.

Точность измерений фазовыми дальномерами во многом зависит от выбора длины волны. Для коротких волн более точно можно определять влияние атмосферы. Но использование этих волн вызывает трудности по измерению разности фаз и разрешению многозначности. В фазовых светодальномерах это противоречие разрешается за счет амплитудной модуляции световых волн, при которой на волны высокой (несущей) частоты накладываются волны низкой (измерительной) частоты. Несущая частота позволяет достаточно надежно учитывать влияние атмосферы, а измерительная – облегчает определение домеров фазовых циклов и разрешение многозначности.

В практике инженерно – геодезических работ получили распространение лазерные безотражательные дальномеры, которые измеряют расстояние до любого (практически) объекта без установки на нем отражателя.

Основная особенность лазерных дальномеров по сравнению со светодальномерами – большая дальность действия и возможность в некоторых случаях определять расстояния до объектов без установки на них отражателей. При этом отражателем является поверхность самого объекта. С использованием отражателя дальность действия приборов увеличивается.

Основные характеристики некоторых лазерных безотражательных дальномеров

Таблица 9

Марка прибора	Фирма-изготовитель	Дальность без отражат./с отражат	Точность	Масса, кг
Data Disto	Leica Швейцария	30 м / 100 м	3 мм	0,6
Power Disto	Leica Швейцария	60 м / 140 м	3 мм	0,67
Minimeter MM30	Sokkia Япония	30 м / 100 м	3 мм	0,58
LEM 30	Jepoptik Германия	30 м / 100 м	3 мм	0,36
PULSAR 50	Sokkia Япония	50 м / 14 км	3 мм + 5 ppm	1,7
PULSAR 100	Sokkia Япония	100 м / 10 км	5 мм + 5 ppm	1,7
PULSAR 500	Sokkia Япония	500 м / 15 км	10 мм + 5 ppm	1,85

С помощью светодальномеров можно измерять расстояние между двумя точками в пределах прямой видимости, поэтому дальность действия даже лазерных светодальномеров на земной поверхности ограничена вследствие влияния кривизны Земли. Радиоволны обладают способностью огибать препятствия и земную поверхность, поэтому с помощью дальномеров и систем, в которых используется радиоволновый диапазон электромагнитных колебаний, можно измерять более длинные линии. Однако вследствие большой расходимости радиоволн отраженный от отражателя в конечной точке сигнал придет в начальную точку слабым и его будет очень трудно выделить на фоне помех, поэтому в радиодальномерах применяют активный отражатель – ретранслятор. Этот ретранслятор называют ведомой станцией.

Принцип работы радиодальномеров

Передатчик радиодальномера генерирует колебания несущей частоты ω_1 , которые модулируются колебаниями масштабной частоты кварцевого генератора Ω_1 . Модулированные колебания излучаются параболической антенной в направлении ведомой станции.

Предположим, ведущая станция расположена в точке A , а ведомая станция находится в точке B . Текущая фаза колебаний кварцевого генератора в точке A определяется выражением

$$\varphi_1^A = \Omega_1 t + \varphi_{01}$$

где φ_{01} – начальная фаза.

При прохождении расстояния D до ведомой станции фаза этих колебаний в точке B будет

следующей:

$$\varphi_1^B = \Omega_1 (t - \tau_D) + \varphi_{01}.$$

где $\tau_D = D/c$.

Колебания, излучаемые ведомой станцией в направлении ведущей, модулируются своим кварцевым генератором и имеют фазу

$$\varphi_2^B = \Omega_2 t + \varphi_{02}.$$

После прохождения расстояния D до ведущей станции фаза этих колебаний в точке A будет равна

$$\varphi_2^A = \Omega_2 (t - \tau_D) + \varphi_{02}.$$

Предположим, что $\Omega_1 > \Omega_2$. После амплитудного детектирования на ведущей станции выделяется и подается на фазометр низкочастотный (НЧ) сигнал с фазой

$$\varphi_1^A = \varphi_1^A - \varphi_2^A = (\Omega_1 - \Omega_2)t + \Omega_2 \tau_D + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) - \psi_1,$$

где ψ_1 — дополнительная фазовая задержка в цепях ведущей станции. Аналогично на ведомой станции, после амплитудного детектирования, образуется НЧ сигнал с фазой

$$\varphi_B = \varphi_1^B - \varphi_2^B = (\Omega_1 - \Omega_2)t - \Omega_1 \tau_D + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) - \psi_2, \quad (45)$$

где ψ_2 — дополнительная фазовая задержка в цепях ведомой станции.

Этот НЧ — сигнал, выделенный на ведомой станции, передается на ведущую при помощи дополнительной модуляции и после детектирования в частотном детекторе подается на фазометр. При этом его фаза будет равна фазе с учетом задержки, полученной в результате прохождения расстояния D , и соответствующих цепей обеих станций:

$$\varphi_{11}^A = (\Omega_1 - \Omega_2)t - \Omega_1 \tau_D + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) - \psi_2 - (\Omega_1 - \Omega_2) \tau_D - \psi_3,$$

где ψ_3 — фазовые задержки в цепях станций.

Следовательно, на фазометр поступают сигналы с разностью фаз

$$\varphi = \varphi_1^A - \varphi_{11}^A = 2\Omega_1 \tau_D - \psi_1 + \psi_2 + \psi_3.$$

Эта формула получена в предположении, что $\Omega_1 > \Omega_2$, т.е. разность $\Omega_1 - \Omega_2 = \Omega$ положительна. В радиодальномере на ведомой станции имеются две переключаемые частоты

модуляции Ω_2^+ и Ω_2^- , одна из которых меньше, а другая больше частоты модуляции ведущей станции Ω_1 на одинаковую небольшую величину Ω . При измерении на частоте модуляции Ω_2^- получим фазу сигнала

$$\varphi' = -2 \Omega_1 \tau_D - \psi_1 + \psi_2 + \psi_3.$$

Если измерить величины φ , φ' и вычислить их полуразность, получим

$$\frac{\varphi - \varphi'}{2} = 2\Omega_1 \tau_D.$$

Это выражение можно записать в виде

$$\frac{\varphi - \varphi'}{2} = \Omega_1 \tau_{2D},$$

где $\tau_{2D} = 2 \tau_D$.

Полное время прохождения двойного расстояния τ_{2D} равно

$$\tau_{2D} = NT + \tau, \quad (46)$$

где N – целое число периодов T частоты Ω_1 ; τ – доля периода. По фазометру измеряют только долю фазового цикла – величину, не превышающую 2π , т.е. результаты измерения дают τ – дробную часть периода. Для определения целого числа периодов N в выражении (46) выполняют измерения на других частотах модуляции.

В качестве несущих используются электромагнитные колебания с частотой от 3 до 35 ГГц. Модуляция осуществляется по частоте. Используемые частоты модуляции 7,5 – 75 МГц (число частот до 5). Недостатком радиодальномеров является малая направленность излучения; появление, кроме прямых, сигналов, отраженных от земли и местных предметов и прошедших другой путь, что искажает результаты измерений. Относительная ошибка определения расстояний фазовыми радиодальномерами около 1/150000 на расстояниях до 50 км.

§ 30. Нивелирование.

Нивелированием называют работы с целью определения разности высот точек земной поверхности, а также их высот относительно принятой отсчетной поверхности. В результате нивелирования определяют превышения h , а затем вычисляют высоты точек H .

Виды нивелирования

Геометрическое нивелирование выполняется горизонтальным лучом визирования, который получают при помощи приборов, называемых нивелирами.

Тригонометрическое нивелирование производит наклонным лучом. Для определения превышения измеряют угол наклона и расстояние между пунктами. Применяемые приборы:

теодолиты и тахеометры.

Физическое нивелирование разделяется на барометрическое, гидростатическое и аэронивелирование.

§ 31. Геометрическое нивелирование.

Геометрическое нивелирование наиболее распространенный вид нивелирования.

Для определения превышений здесь используется горизонтальная линия визирования, создаваемая геодезическим прибором – нивелиром.

Для выполнения работ также необходимы нивелирные рейки, устанавливаемые в нивелируемых точках местности. Положение горизонтального визирного луча фиксируется отсчетами по вертикально стоящим рейкам.

Применяются два способа геометрического нивелирования: «из середины» и «вперед».

При нивелировании «из середины» (рис. 41а) нивелир устанавливают так, чтобы расстояния до обеих точек были одинаковыми, а при нивелировании «вперед» прибор устанавливают (рис. 41б) вблизи одной из точек. Превышение h и в том и другом случае определяют по формуле

$$H = a - v,$$

где a – отсчет по нивелирной рейке, установленной на точке A ;

v – отсчет по рейке, установленной на точке B . Превышение h имеет знак плюс, когда $a > v$, и знак минус, когда $a < v$.

Если высота точки A известна, то высота точки B вычисляется по формуле

$$H_B = H_A + h.$$

При нивелировании «из середины» в направлении от точки A к точке B рейка, установленная в точке A , называется задней, а рейка в точке B – передней.

Нивелирование «из середины» применяется при проложении нивелирных ходов. Достоинством этого метода является то, что в нем компенсируются ошибки, связанные с невыполнением основного геометрического условия нивелира (основное геометрическое условие нивелира – линия визирования должна быть горизонтальна).

Метод нивелирования «вперед» применяется в том случае, когда с одной установки нивелира необходимо определить высоты большого числа точек. Вычисление отметок точек при этом удобно выполнять от горизонта прибора ГП – отметки горизонтальной линии визирования:

$$ГП = H_A + a.$$

Отметки определяемых точек находят по формулам:

$$H_B = \Gamma\Pi - a,$$

$$H_C = \Gamma\Pi - c,$$

.....

.....

$$H_N = \Gamma\Pi - n,$$

где a, c, n – отсчеты по рейкам, установленным в точках B, C, \dots, N .

Последовательное нивелирование, нивелирный ход.

Последовательное нивелирование или нивелирный ход, то есть нивелирование с несколькими постановками прибора (рис. 42) применяют при значительном (более 200 м) расстоянии или превышении между двумя точками. В точках 1, 2, 3, ..., называемых связующими, рейку устанавливают на деревянные колья, металлические штыри (костыли) или специальные металлические башмаки. Общее превышение между точками A и B равно сумме элементарных превышений:

$$h_0 = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n.$$

Можно записать $h_1 = a_1 - a_1,$

$$h_2 = a_2 - a_2,$$

.....

$$h_n = a_n - a_n.$$

Суммируя левые и правые части равенств, получим:

$$h_0 = \sum_1^n a - \sum_1^n a.$$

Суммарное превышение равно сумме отсчетов по задней рейке минус сумма отсчетов по передней рейке.

Замкнутый нивелирный ход. Замкнутым называется ход, который начинается и заканчивается в одной и той же точке. Ход прокладывается (рис. 43) от репера (P_{11}) – точки с известной высотой – для определения высот точек 1, 2, 3, Сумма превышений в замкнутом ходе равна нулю. Следовательно, можно записать:

$$\sum_{\text{теор}}^n h = 0$$

Сумма практически полученных превышений не будет равна нулю, а будет равна какой-то величине, называемой невязкой f_h ,

$$\sum_{\text{факт}}^n h = f_h.$$

Значение невязки не должно превышать величины $\pm 0,05 f_h$, устанавливаемой в зависимости

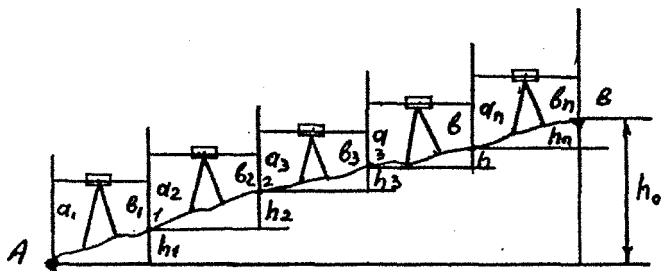


Рис. 42

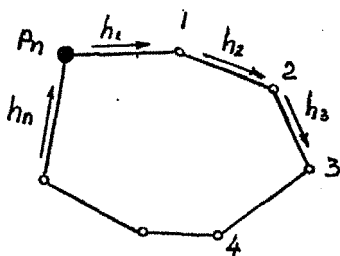


Рис. 43

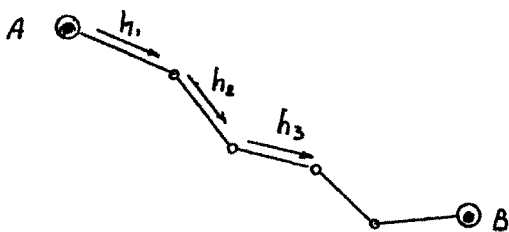


Рис. 44

от класса (точности) нивелирования.

Если $f_h \leq \sigma_{\text{от}} f_h$, то превышения исправляют введением поправки, значение которой V_h определяется по формуле

$$V_h = -f_h / n,$$

где n – число превышений (или станций).

Отметки точек вычисляют, начиная от репера, по формуле

$$H_K = H_{K-1} + h_{\text{вып}},$$

где H_{K-1} – отметка предыдущей точки;

$h_{\text{вып}}$ – превышение, исправленное поправкой, между предыдущей и определяемой точкой.

Разомкнутый нивелирный ход. Разомкнутым называется нивелирный ход, который прокладывается (рис. 44) между двумя точками с известными высотами. На рис. 44 ход проложен от репера A к реперу B для определения высот точек 1, 2, 3.....Сумма превышений между двумя реперами известна. Теоретически она равна разности отметок этих реперов:

$$\sum_{\text{теор}}^n h = H_B - H_A.$$

Из измерений получают практическую сумму превышений

$$\sum_{\text{пр}}^n h = h_1 + h_2 + \dots + h_n.$$

Невязку в превышениях по ходу вычисляют по формуле

$$f_h = \sum_{\text{пр}}^n h - \sum_{\text{теор}}^n h$$

Далее выполняют те же операции, что и в замкнутом нивелирном ходе.

§ 32. Нивелиры

Нивелир – геодезический прибор, создающий в пространстве горизонтальную визирную линию относительно которой определяют превышения (при геометрическом нивелировании).

По конструкции нивелиры бывают оптические и цифровые. По способу приведения визирной оси нивелира в горизонтальное положение различают нивелиры с уровнем и нивелиры с компенсатором. Отдельную группу составляют лазерные нивелиры.

Согласно ГОСТ 10528 – 76 нивелиры по точности подразделяются в соответствии с данными таблицы 10.

Таблица 10

Тип нивелира	Краткая характеристика
Н - 05	Нивелир высокоточный с оптическим микрометром для определения превышений со средней квадратической ошибкой не более 0,5 мм на 1 км двойного хода
Н - 3 (Н - ЗЛ, Н - ЗК, Н - ЗКЛ)	Нивелир точный для определения превышений со средней квадратической ошибкой не более 3 мм на 1 км двойного хода
Н - 10 (Н - 10Л, Н - К, Н - 10КЛ)	Нивелир технических для определения превышений со средней квадратической ошибкой не более 10 мм на 1 км двойного хода

Оптические нивелиры выпускаются с уровнем при зрительной трубе и с компенсатором углов наклона. Буква К означает компенсатор, буква Л обозначает наличие лимба для измерения горизонтальных углов.

Нивелир Н - 3. Оптический нивелир с уровнем

Нивелир Н - 3 является нивелиром с цилиндрическим уровнем. На рис. 45 приведена схема нивелира Н - 3. Здесь 1 - подставка с тремя подъемными винтами, 2 - элевационный винт, 3 - зрительная труба, 4 - цилиндрический уровень, 5 - кремальера, 6 - закрепительный и 7 - наводящий винты трубы. На схеме не показан круглый уровень.

Нивелир Н - 3К. Оптический нивелир с компенсатором.

Схема нивелира Н - 3К приведена на рис. 46. здесь 1 - объектив, 2 - фокусирующая линза, 3 - подвижная призма, подвешенная на скрещивающихся нитях, 4 - неподвижная призма, 5 - сетка нитей, 6 - окуляр.

Предварительная установка нивелира осуществляется по круглому уровню. Компенсатор призмного типа. Линза 3 подвешена на скрещивающихся нитях. Для гашения колебаний имеется демпфер 7. диапазон работы компенсатора $\pm 15'$. Наведение трубы на рейку осуществляется сначала поворотом от руки, а затем винтом бесконечного наведения.

Основное требование к нивелирам - линия визирования должна быть горизонтальна. Для проверки выполнения этого условия производят поверки и если необходимо - исправления - юстировки нивелира.

Цифровые нивелиры

Цифровые нивелиры отличаются от оптических нивелиров тем, что отсчет по рейкам выполняется автоматически считывающим устройством. На рейке вместо обычных делений нанесен штрих - код. Одновременно с получением отсчета определяется расстояние до рейки.

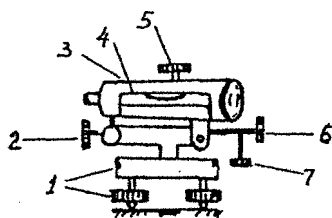


Рис. 45

Поле зрения
трубы. Отсчет
1236.

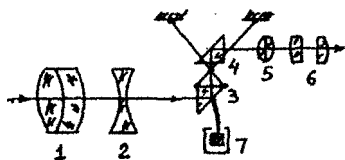
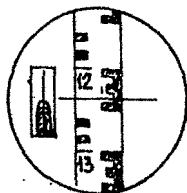


Рис. 46

Приборы снабжены процессором и программой, позволяющей вычислять превышения высоты точек, расстояния до нивелируемых точек а также накапливать данные полевых измерений в памяти прибора.

В таблице 11 приведены основные характеристики некоторых цифровых нивелиров.

Таблица 11

Цифровые нивелиры

Технические характеристики	Фирма и модель				
	"Sokkia" SDL30M	Trimbe DiNi12 DiNi22		Leica DNA 03 DNA 10	
Средняя квадратическая погрешность измерений на 1 км двойного хода	0,6	0,3	0,7	0,3	0,9
Точность измерения расстояний	$0,1\% \times D - 0,2\% \times D$	$0,05\% \times D$		$0,05\% \times D$	
Время измерений, сек.	3	3	2	3	
Рабочая температура	$-20^{\circ} - + 50^{\circ}$	$-20^{\circ} - + 50^{\circ}$		$-20^{\circ} - + 50^{\circ}$	
Диапазон работы компенсатора	$\pm 15'$	$\pm 15'$		$\pm 10'$	
Вес прибора, кг	2,4	3,5	3,2	2,8	2,8
Встроенная память	2000 измерений	2200 строк		6000 измерений	

Лазерные нивелиры и построители опорных плоскостей

Лазерные нивелиры предназначены для задания горизонтальной, наклонной или вертикальной плоскости при помощи лазерного луча. Основное отличие лазерных приборов от оптических нивелиров заключается в возможности увидеть построенную опорную плоскость.

Эти приборы успешно применяют при выполнении высотных разбивок, контроле работы планировочных машин, установке сантехнического оборудования, при контроле разработки траншей и укладке труб в траншею под заданным уклоном. Некоторые из приборов позволяют создавать вертикальные опорные плоскости или линии, что используется для передачи осей на монтажные горизонты, контроля установки колонн, проверки вертикальности и ровности стен различных сооружений.

При контроле разработки траншеи и укладки труб по заданному уклону используется лазерный указатель уклона, который устанавливают в колодце рис. 47. Лазерному лучу задают проектный уклон. Ровность дна траншеи контролируют по рейке, устанавливаемой на дно вслед за экскаватором. Замеченные отклонения ликвидируют вручную. Укладку труб (см. рис.) контролируют с помощью экрана – марки, устанавливаемой на торце монтируемой секции труб. На матовом экране нанесены концентрические окружности, с центром которых при правильной укладке труб должен совпадать центр лазерного пятна. Лазерные визиры для

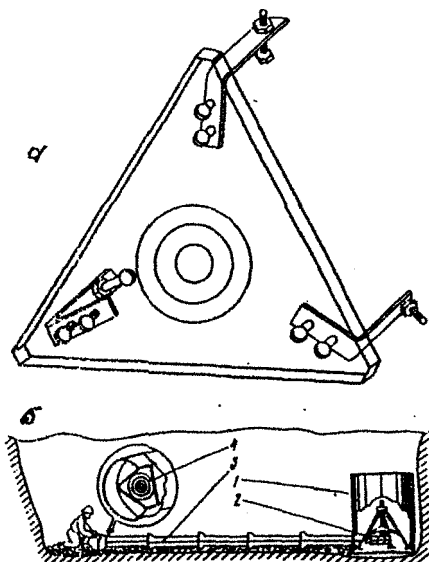


Рис. 4.7: Экран-таргет (а); схема контроля укладки труб по лазерному пикету (б):
 1 — колодезь; 2 — лазерный визир; 3 — луч; 4 — экран

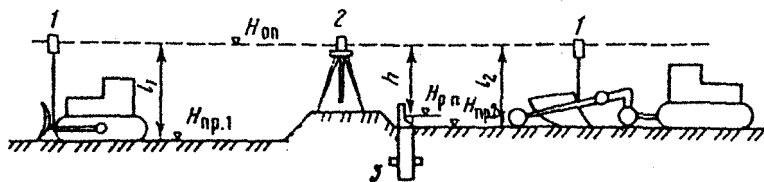


Рис. 4.8

контроля укладки труб изготавливаются в герметичном исполнении, имеют шкалу для задания проектного уклона. В качестве датчика уклона в них используется цилиндрический или электронный уровень с сервоприводом, позволяющий автоматически удерживать лазерный луч с заданным уклоном.

Прибор «Dailgrade» фирмы «Spectra - physics» для укладки подземных трубопроводов имеет влагозащитный корпус, электронный уровень, диапазон задания уклоном – 15% до + 40%. Обеспечиваемая точность менее ± 5 мм на 100 м. Дальность действия до 150 м.

На рис. 48 показано применение лазерного построителя горизонтальной плоскости для контроля работы планировочных механизмов.

Перед началом работ лазерный построитель опорной плоскости – передатчик 2 (рис. 48) устанавливают в центре разрабатываемого участка и приводят в рабочее положение. Отметку опорной плоскости $H_{оп}$, созданной передатчиком, определяют после измерения высоты луча h над репером 3, отметка которого $H_{рп}$ известна,

$$H_{оп} = H_{рп} + h.$$

Устанавливают фотоприемник 1 на необходимую высоту, которая вычисляется по формуле

$$l = H_{оп} - H_{пр},$$

где $H_{пр}$ – проектная отметка разрабатываемого участка.

С одной станции передатчик может обслуживать несколько участков (см. рис. 48) с различными проектными отметками $H_{пр1}$, $H_{пр2}$, соответственно для этих участков будут свои значения l_1 , l_2 .

Во время работы, в зависимости от того, какой или какие элементы фотоприемника засвечиваются лучем лазера, на панели индикатора, расположенного перед оператором землеройного механизма, включается одна из семи ламп. По этой лампе оператор может установить, где находится механизм: на проектной отметке, выше или ниже ее.

Предусмотрено два варианта работы с системой: «ручной», когда оператор механизма, руководствуясь показаниями индикатора вручную управляет режущим органом планировочной машины, и автоматический, когда положением рабочего органа управляет фотоприемник.

Ручной режим используется на стадии предварительной планировки, когда перемещаются основные объемы грунта. Автоматический режим применяют на стадии окончательной планировки. Дальность действия подобных систем до 500 м. Средняя квадратическая погрешность планировки порядка ± 3 см. В таблице 12 приведены основные характеристики лазерных нивелиров и построителей опорных линий и плоскостей различных фирм.

Таблица 12 Лазерные нивелиры и построители опорных линий и плоскостей

Модель	Фирма	Тип компенсатора точн/диап	Плоскость	Тип лазера	Назначе-ние	Точность	Радиус дейст-вия
Электроник Левел L130 L220 L500 L750	Spectra- Physics - - - -	электронный $\pm 10'$	горизонт. горизонт. горизонт. горизонт.	лазерн. дмод (невид.)	Нивели- рование	4 мм на 1000 м 4 мм на 50 м 2,6 мм на 50 м 2,6 мм на 100м	130 м 220 м 500 м 750 м
Пламб Плейн 1146	Spectra- Physics	электронный	вертикальн.	видим.	Строит. работы	2,4 мм на 30 м	150 м
Диалгрейд 1250	Spectra- Physics	электронный	луч с укло- нами от -15% до 40%	видим.	укладка под трубо- проводов	5 мм на 100 м	150 м
LASERPLANE L 500 C L 600 L 800	SPEKTRA PRECISION - -	нитяной с возд. демпфером $\pm 8'' / \pm 11'$	горизонт. горизонт. горизонт.	невид. видим. видим. видим.	нивелиров. управл.плавн машинами		500 м 600 м 800 м
Laserplane Model 1145	SPEKTRA Physics	$5 - 8'' / \pm 5''$	наклон по двум осям до 9,99%	видим.	контроль работы пла- нир.механ. строитель- ные работы	2,4 мм на 30 м	300 м
Lasermat LP - 30 LP - 31	SPEKTRA PRECISION SOKKIA SOKKIA	$\pm 20'' / \pm 6''$ $\pm 10'' / \pm 10'$ $\pm 15'' / \pm 10'$	горизонт.и вертик. горизонт. горизонт.	видим. невид. невид.	строительн. строительн. строительн.	0,1 мм на 1 м $\pm 1,5$ мм на 30 м $\pm 2,25$ мм на 30м	150 м 300 м 120 м
PRIMUS	NEDO Германия	$\pm 20'' / \pm 5''$	гориз.плоск вертик.луч	видим.	строительн.	$\pm 0,2$ мм на 1 м	100 м

§ 33. Тригонометрическое нивелирование.

Тригонометрическое нивелирование выполняется при решении различных инженерных задач с целью создания высотной основы топографической съемки, а также при выполнении самой топографической съемки.

Для определения превышения h в точке A устанавливают теодолит (рис. 49), а в точке B вежу или рейку, наводят трубу на верх визирного знака и измеряют угол наклона v . Должны быть измерены горизонтальное проложение d , высота теодолита над точкой a , высота знака l .

Из рисунка следует:

$$h + l = h' + a \quad \text{или} \quad h = h' + a - l.$$

$$\text{Поскольку } h' = d \operatorname{tg} v \quad \text{то} \quad h = d \operatorname{tg} v + a - l$$

С учетом кривизны Земли и влияния рефракции светового луча

$$h = d \operatorname{tg} v + a - l + f,$$

где f — поправка за кривизну Земли и рефракцию

$$f = \frac{0,42d^2}{R}.$$

Сокращенная формула тригонометрического нивелирования (применяется когда $l = d$)

$$h = d \operatorname{tg} v.$$

При определении расстояний нитяным дальномером

$$d = n \cdot k \cdot \cos^2 v + c.$$

Отсюда

$$h = n \cdot k \cdot \sin v \cdot \cos v + c \cdot \sin v = \frac{1}{2} n \cdot k \cdot \sin 2v + c \cdot \sin v.$$

Для углов наклона, не превышающих 10° , $\sin v \approx \frac{1}{2} \sin 2v$,

$$\text{Поэтому} \quad h = \frac{1}{2} (k \cdot n + c) \cdot \sin 2v.$$

В том случае, когда для определения высот точек прокладывается ход тригонометрического нивелирования, допустимая невязка превышений в ходе определяется из выражения

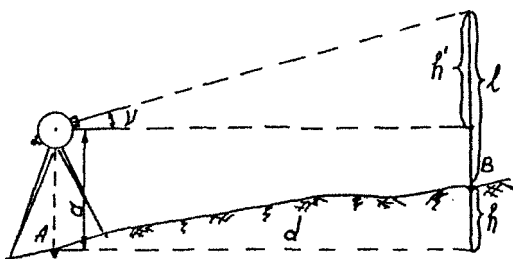


Рис. 49

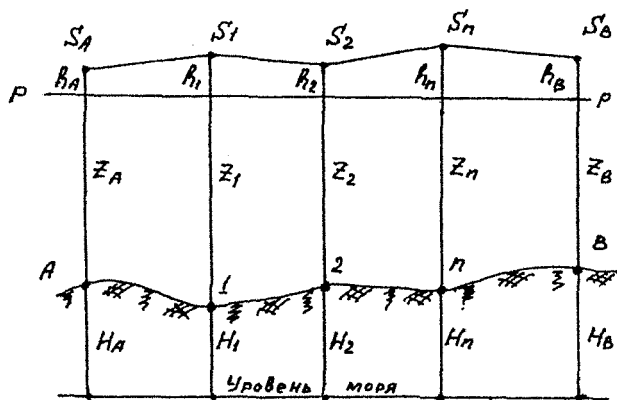


Рис. 50 Схема аэронивелирования

$$\Delta h = \pm (0.04 \cdot S \cdot \sqrt{n}) \text{ м}$$

где S – средняя длина линии хода, выраженная в сотнях метров,
 n – число линий в ходе.

С целью ослабления влияния рефракции тригонометрическое нивелирование на больших расстояниях целесообразно производить спустя 2 – 3 часа после восхода солнца и не позже 2 – 3 часов до его захода.

Для ускорения работ по тригонометрическому нивелированию вместо теодолитов с успехом применяют специальные комбинированные геодезические приборы – тахеометры с автоматической регистрацией результатов измерений.

§ 34. Барометрическое нивелирование.

Этот вид нивелирования основан на зависимости между высотой точки местности и величиной атмосферного давления в данной точке. Благодаря простоте и высокой производительности барометрическое нивелирование применяется при выполнении геологических исследований в труднодоступных зеленых и, главным образом, в горных районах. Однако точность метода невелика – погрешность определения высот достигает одного и более метров.

Существует ряд формул, устанавливающих зависимость между разностью высот точек местности и измеренными значениями давлений в этих точках. Наиболее употребительной а производственных условиях является следующая:

$$h = h_{\text{ст}} \Delta B.$$

Здесь $\Delta B = B_1 - B_2$ – разность атмосферного давления в наблюдаемых точках;
 $h_{\text{ст}}$ – барометрическая ступень (высота, на которую нужно поднять или опустить барометр, чтобы его показания изменились на 1 мм рт.ст. – около 10 м на уровне моря):

$$h_{\text{ст}} = 8000 (1 + \alpha t) / B,$$

где $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$, $B = \frac{B_1 + B_2}{2}$ – соответственно средняя температура и среднее значение давления; $\alpha = \frac{1}{273,2}$. Из-за неравномерного распределения плотности воздуха,

обусловленного, в частности, различием температур в точках, лежащих на одной высоте, давление может быть различным, т.е. *изобарические поверхности* – поверхности, на которых атмосферное значение одинаково – не параллельны уровенным поверхностям.

Поэтому и расстояние между *изобарами* – линиями пересечения изобарических поверхностей с уровнем – непостоянно.

Изменение давления по направлению нормали к изобарам на отрезке в 111 км (длина дуги

меридиана в 1° на экваторе) - *барических градиент* - в среднем составляет $0,01 - 0,02$ мм рт.ст./км. Неравномерное состояние атмосферы обуславливает и временное изменение давления в одной и той же точке, которое составляет в среднем $0,3$ мм рт.ст./ч, достигая $\pm 1,5$ мм рт.ст./ч, что может привести к грубой ошибке в определении превышения. Например, при измерении давления во второй точке на час позже, чем в первой, может привести к ошибке в определении превышения до 15 м.

Определение средней температуры воздуха не всегда надежно. Практически ее определяют как среднюю по измерениям в нескольких точках. В то же время изменения температуры в горизонтальном направлении на расстоянии $10 - 20$ км могут достигать $8 - 10^\circ\text{C}$, а в вертикальном наблюдаются даже температурные инверсии. Погрешность определения температуры в 2°C приводит к ошибке в определении превышения в $\frac{1}{100}$.

Для ослабления влияния указанных факторов на точность определения превышений барометрическое нивелирование проводят по определенной методике, которая предусматривает фиксацию изменения давления и температуры через строго определенные промежутки времени, ограничение длины маршрута и времени нивелирования, выполнение наблюдений на точках только в ясную погоду, в утренние и вечерние часы. При барометрическом нивелировании для измерения давления обычно применяют барометр - анероид, который предварительно эталонируют по показаниям ртутного барометра, в результате чего составляют аттестат для данного анероида, в котором приводятся поправки анероида. Время наблюдений фиксируется по выверенным хронометрам.

Выпускаемые в настоящее время микробарометры (ОМБ, МБНП, МБ) позволяют повысить точность отсчетов давлений по прибору, однако к существенному повышению точности определения превышений это не приводит в силу характера причин колебаний давления, о которых упоминалось выше.

Каждое показание анероида приводят к показанию ртутного барометра введением поправок. Так, например, если A - отсчет по анероиду, то действительное атмосферное давление, которое показал бы ртутный барометр при 0°C и нормальной силе тяжести (на уровне моря и на широте 45°), можно найти по формуле

$$B_0 = A + a + bt_A + c(760 - A),$$

где a - разность показаний ртутного барометра и анероида при $t_A = 0$ и нормальном давлении; bt_A - температурная поправка; b - температурный коэффициент; $c(760 - A)$ - поправка шкалы, зависящая от изменения давления воздуха, c - коэффициент пропорциональности.

Для определения разности высот двух каких - либо точек необходимо на каждой из них записать показания анероида A , температуры анероида t_A , температуры наружного воздуха, высоты анероида (обычно анероид держат на высоте груди) и указать время измерения (год, месяц, число, час и минуты). На каждой точке анероиду дают отстояться в течение $15 - 20$ мин

и после этого берут отсчет.

Нивелирование двумя анероидами. В середине участка на станции располагается один из наблюдателей, который регулярно записывает показания анероида (станционного) через каждые 20 – 30 мин. Второй наблюдатель, после сравнения показаний своего анероида со станционным, отправляется на все намеченные к нивелированию точки и записывает на них показания приборов. По окончании работ и возвращении на станцию снова записывают показания по полевым и станционным приборам. Так осуществляется контроль наблюдений. Несовпадение моментов полевых измерений со станционными не имеет значения, так как для любого отсчета по полемому анероиду можно вычислить интерполяцией тот отсчет, который получился бы в этот момент на станции. Для вычисления абсолютных высот необходимо знать высоту станции.

Нивелирование одним анероидом выполняет наблюдатель, который в каждой точке записывает показания приборов, возвращается в начальную точку маршрута и делает в ней контрольную запись показаний приборов. Полученное расхождение в давлении распределяется с соответствующим знаком на все наблюдаемые точки пропорционально времени. Эта поправка называется поправкой за время. Значения барометрических ступеней определяют по таблицам (например, Хренов Л.С. Таблицы для барометрического нивелирования. – М., Недра, 1970).

Гидростатическое нивелирование

Данный вид нивелирования основан на использовании свойства уровней жидкости в сообщающихся сосудах. Если взять два прозрачных сосуда (стеклянные трубки), поместить их в оправы с делениями, соединив шлангом, наполнить жидкостью, то по разности отсчетов уровней жидкости в сосудах можно определять превышения. Ошибка определения превышений при этом не превышает 0,1 – 1 мм. Метод применяется для нивелирования фундаментов турбин, компрессоров, монтаже сантехнического оборудования.

§ 35. Аэрорадионивелирование

Аэрорадионивелирование выполняется с самолетов при помощи радиовысотомера и статоскопа, работающего по принципу дифференциального барометра.

Радиовысотомером измеряют высоты от самолета до земной поверхности, статоскопом – изменения высоты полета самолета относительно произвольно выбранной поверхности.

В начале маршрута самолет пролетает над точкой A с известной высотой H_A рис. 50 и измеряет высоту полета радиовысотомером Z_A . Одновременно фиксируется показание статоскопа для определения h_A (статоскоп – дифференциальный барометр, измеряющий изменения давления; по изменению давления можно определить изменения высоты полета h).

В дальнейшем летчик пролетает над точками маршрута 1, 2, ..., n и в каждой точке фиксирует Z_n и h_n . Высоты этих точек можно вычислить по формуле

$$H_n = H_A + (Z_A - h_A) - (Z_n - h_n).$$

В конце полета самолет пролетает над точкой B , высота которой H_B также известна и измеряет Z_B и h_B . Вычисляют $H_{\text{выш}} = H_A + (Z_A - h_A) - (Z_B - h_B)$.

Сравнивают $H_{\text{выш}}$ и H_B и находят невязку f_h которая возникает вследствие искривления изобарической поверхности PP за время полета T

$$f_h = H_{\text{выш}} - H_B.$$

Вычисляют поправки в измеренные высоты точек по формуле

$$\delta_{\text{ин}} = -\frac{f_h}{T} \cdot t_n,$$

где t_n – время полета от точки A до точки n . Вводят поправки в измеренные высоты и получают H_n исправленные

$$H_{n \text{ испр}} = H_n + \delta_{\text{ин}}.$$

Ошибки определения высот при аэрорадионивелировании составляют $\pm 2,5$ м.

Глава 5 Геодезические сети

§ 36. Понятие о государственной геодезической сети.

Для обеспечения возможности картографирования страны (в том числе и геологического), решения научных и практических задач на территории России размещена сеть точек, образующая систему надежно закрепленных на местности пунктов, координаты которых получены с высокой точностью в единой системе. Она составляет *государственную геодезическую опорную сеть*, реализованную на основе следующих основных принципов: непрерывности; необходимой густоты пунктов; точности, достаточной для решения научных и практических задач.

Государственная геодезическая сеть подразделяется на плановую и высотную (нивелирную). Первая служит для определения плановых координат (x, y), вторая – для определения абсолютных высот. Основной принцип построения сетей – от общего к частному – от крупных высокоточных к более мелким и менее точным.

В соответствии с этим геодезические сети подразделяются на государственные сети, сети сгущения и съемочные.

§ 37. Плановая государственная геодезическая сеть.

Методы создания плановой государственной сети.

1. Триангуляция – метод создания сети в виде треугольников, в которых измерены все углы и некоторые из сторон. Длины остальных вычисляются по теореме синусов. На рис. 51 длины сторон AB – s_1 и CD – s_2 измерены (базисы). По сторонам и дирекционным углам вычисляют координаты вершин треугольников.

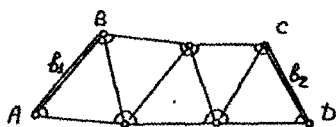


Рис. 51



Рис. 52

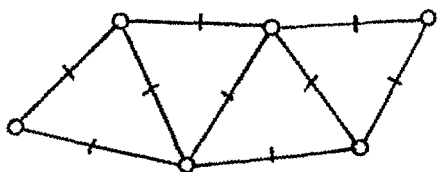


Рис. 53

2. Полигонометрия – метод построения плановой геодезической сети путем измерения углов и расстояний между геодезическими пунктами (рис. 52). Стороны измеряют дальномерами.

Сеть создается в виде отдельных ходов или систем ходов.

3. Трилатерация – метод создания геодезической сети в виде треугольников (рис. 53), стороны которых измеряют свето – и радиодальномерами (чаще последними, когда нет прямой видимости между пунктами). Из решения треугольников по теореме косинусов находят значения всех углов.

Плановая государственная геодезическая сеть к настоящему времени, в основном, построена. Она подразделяется на сети 1, 2, 3 и 4 классов, различающихся между собой точностью измерений, расстояниями между пунктами сети и порядком развития (рис. 54).

Сеть 1 класса служит для научных исследований и определяет единую для всей страны систему координат. Она представляет собой четырехугольные полигоны периметром 800 – 1 000 км, стороны которых ориентированы преимущественно по меридианам и параллелям. Каждая сторона (звено) полигона длиной 200 – 250 км состоит (в основном) из рядов триангуляции. На стыке звеньев измерены базисные стороны, на концах которых определены астрономические широты, долготы и азимуты. Расстояния между пунктами в звеньях 20 – 30 км. На некоторой части территории России построена не полигональная (см. рис. 54), а сплошная сеть триангуляции 1 класса с длиной сторон в треугольнике 20 – 70 км.

Все измерения – высокоточные. В каждом треугольнике измерены все углы со средней квадратической погрешностью $0''$, 7. Линии длиной в 20 – 25 км определены с погрешностью 7 – 10 см. погрешность определения астрономических широт – $0,3''$, долгот – $0,5''$, азимутов – $0,5''$. Относительная среднеквадратическая погрешность базисной стороны $1/400\ 000$.

Полигоны государственной сети 1 класса заполняются сплошной сетью триангуляции (полигонометрии) второго класса. Расстояния между пунктами сторон равны 7 – 20 км. В каждом полигоне 1 класса измерены 4 – 5 базисных сторон триангуляции 2-го класса, равномерно расположенных внутри полигона. В концах каждой базисной стороны измерены астрономические широты, долготы и вычислены геодезические азимуты. Среднеквадратическая погрешность измерения углов в триангуляции 2-го класса – $1,0''$; относительная среднеквадратическая погрешность базисной стороны $1/300\ 000$. Назначение триангуляции второго класса – быть опорой для геодезических сетей более низких (3 и 4) классов.

При построении сетей 3 и 4 классов также использованы методы триангуляции и полигонометрии. Расстояния между пунктами 3 и 4 классов соответственно 5 – 8 и 2 – 5 км; погрешность измерения углов $1,5''$ и $2,0''$ соответственно. Относительная среднеквадратическая погрешность измерения базисных сторон – $1/200\ 000$.

Для ориентирования на каждом пункте государственной сети имеется по два ориентирных пункта, закрепленных на местности, на расстоянии 250 – 1 000 м от пункта триангуляции, направления на которые измерены с погрешностью $2,5''$.

В качестве ориентирных пунктов могут быть использованы и местные предметы (шпиль

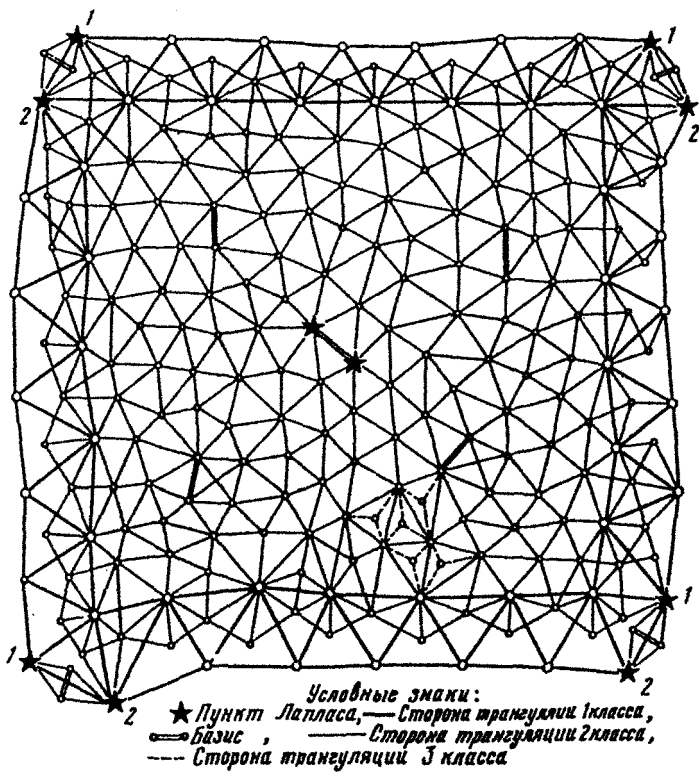


Рис. 54 Схема построения плановой государственной геодезической сети

башни, колокольня), расположенные не далее 3 км от пункта геодезической сети и хорошо видимые с земли.

Пункты государственной геодезической сети закрепляются на местности специальными подземными знаками – центрами, при этом предпринимаются меры, способствующие сохранению их стабильности. Так, например, знаки закладывают в скальные грунты, в условиях значительного увлажнения – в крупнозернистые грунты; сами знаки делаются облегченными сверху, с массивным якорем в нижней части. Нижнее основание знака устанавливается на 0,5 м ниже границы наибольшего промерзания грунта, а в районах мерзлоты – на 1 м ниже границы наибольшего оттаивания, и др. Над подземными строят наружные знаки – пирамиды, сигналы – обеспечивающие взаимную видимость между пунктами и являющиеся хорошими ориентирами на местности. Они могут быть деревянными, металлическими, реже – железобетонными.

Таблица 13 Некоторые характеристики триангуляции

Основные параметры триангуляции	2 класс	3 класс	4 класс
m_p	1"	1,5"	2"
m_s/v	1/300 000	1/200 000	1/100 000
длина стороны, км	8 – 20	5 – 8	2 – 5

§ 38. Высотная (нивелирная) государственная геодезическая сеть.

Данная сеть устанавливает единую систему высот на всей территории России и является основой топографических съемок и геодезических измерений, выполняемых для решения научных и практических задач.

Она позволяет: решать задачи создания сети пунктов с известными высотами; определять разности уровней внутренних и внешних морей и океанов; изучать современные движения земной коры.

За начальную отсчетную уровенную поверхность в СССР принята поверхность Балтийского моря – поверхность, проходящая через нуль Кронштадского футштока.

Государственная нивелирная сеть разделяется на сети I, II, III, и IV классов.

Классификация нивелирования

Сеть нивелирования создается геометрическим нивелированием в виде отдельных ходов или замкнутых ходов – «полигонов».

Государственная нивелирная высотная сеть создается по специально разработанной схеме и бывает I, II, III, IV классов, затем идет технического нивелирование. Точность нивелирования характеризуется средней квадратической погрешностью на 1 км хода и обозначается η .

Допустимая невязка превышений в ходах нивелирования принимается равной удвоенной средней квадратической погрешности. В таблице 14 приведены характеристики точности нивелирования различных классов.

Таблица 14 Характеристика классов нивелирования

Класс нивелирования	Предельный периметр полигона (длина хода), км	Средняя квадратическая ошибка на 1 км двойного хода, η , мм	Допустимая невязка полигона (хода), мм
I	—	0,5	—
II	500 – 600	2,0	$5\sqrt{L}$
III	150 – 200	5,0	$10\sqrt{L}$
IV	25	10,0	$20\sqrt{L}$
Техническое нивелирование		25,0	$50\sqrt{L}$

Здесь L – длина нивелирного хода в км.

Ходы нивелирования I класса прокладываются по специально разработанной программе, предусматривающей:

- создание на территории страны сети исходных пунктов для развития нивелирования II и других классов;
- обеспечение связи водомерных постов морей и океанов;
- изучение геодинамических процессов, вертикальных перемещений земной коры.

Ходы нивелирования II класса прокладываются в виде полигонов периметром 500 – 600 км. Они опираются на реперы I класса.

Ходы нивелирования III класса разбивают полигон II класса на 6 – 9 полигонов периметром 150 – 200 км.

Нивелирование I класса осуществляется по направлениям, географическое положение которых наилучшим образом отвечает решениям упомянутых выше задач. Для обеспечения наивысшей точности нивелирование выполняют по трассам железных, шоссейных и улучшенных грунтовых дорог, а в труднодоступных районах – по тропам, занямкам, вдоль берегов больших рек. В целях модернизации и получения данных о современных движениях земной коры через 25 лет проводятся повторные нивелировки по всем линиям I класса и некоторым линиям II класса.

Нивелирные пункты всех классов закрепляются на местности знаками – глубинными, грунтовыми (рис.55) или стенными *нивелирными реперами*. Их закладывают через 5 – 7 км. Кроме того, пункты I и II классов закрепляются особо устойчивыми фундаментальными реперами через 50 – 80 км.

Построение государственной нивелирной сети России к настоящему времени, в основном, завершено.

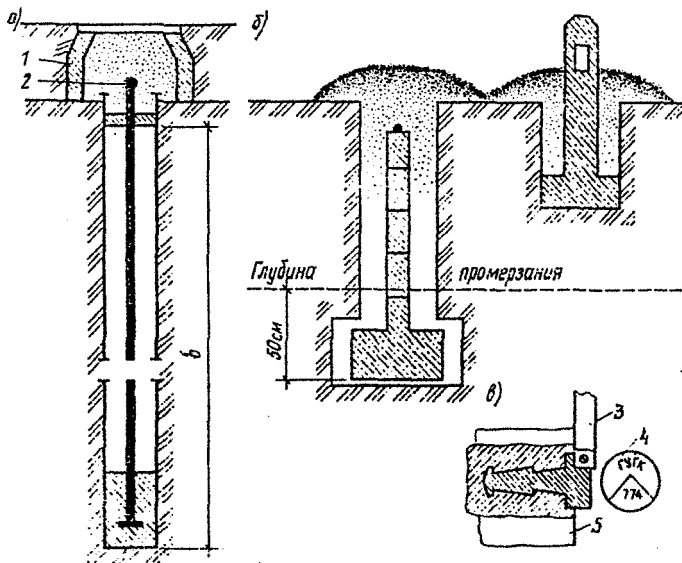


Рис. 55. Схемы глубинного (а), грунтового (б) и стенного (в) реперов:

1 — защитное устройство; 2 — головка репера; 3 — рейка; 4 — репер; 5 — цоколь здания

§ 39. Геодезические сети сгущения.

Эти сети создаются в тех случаях, когда густота пунктов государственной геодезической сети не обеспечивает решение конкретных задач исследований. Они подразделяются на аналитические сети 1 и 2 разряда, развиваемые методом триангуляции, полигонометрические сети, развиваемые полигонометрическими методами. Высотные сети сгущения – это сети технического нивелирования, создаваемые методом геометрического нивелирования.

Геодезические сети местного значения.

Служат для дальнейшего сгущения государственной плановой геодезической сети 1, 2, 3 и 4 классов. Развиваются по мере необходимости. Создаются методами триангуляции и полигонометрии и бывают 1 и 2 разрядов.

Показатели	1 разряд	2 разряд
Средняя квадратическая погрешность измерения угла	5"	10"
Относительная погрешность базисных сторон	1/50000	1/25000

Плановое съемочное обоснование

Строится в развитие сетей высших порядков с целью сгущения сети до плотности, необходимой для данного масштаба съемки, а также с целью создания обоснования для инженерно – геодезических работ (на всех этапах строительства трубопровода или для освоения крупного месторождения).

Методы создания:

1. Микротриангуляция.
2. Теодолитные ходы (аналогия полигонометрии).
3. Геодезические засечки (рис. 56) (а - прямая, б - обратная, в - комбинированная).

§ 40. Построение теодолитных ходов.

Теодолитные ходы прокладываются на местности и используются в качестве планового обоснования при трассировании линейных сооружений, выполнении топографической съемки, производстве разбивочных работ.

Этапы создания теодолитных ходов

1. Проектирование. По имеющимся топографическим материалам составляют схему ходов (проект ходов).
2. Рекогносцировка – обследование и уточнение положения пунктов на местности. Одновременно вершины хода закрепляют бетонными столбами, металлическими стержнями или деревянными кольями.
3. Измерение горизонтальных углов и углов наклона теодолитом Т – 30. горизонтальные

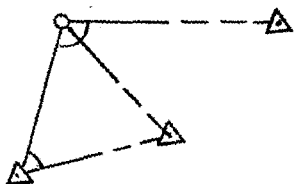
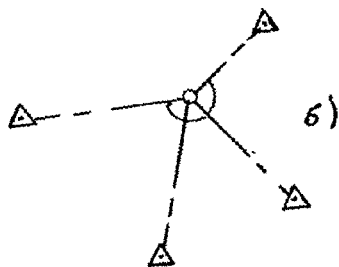
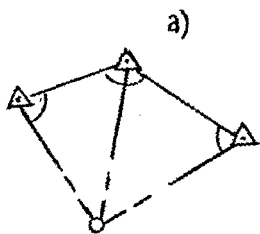


Рис. 56

углы измеряют одним приемом. Измеряют правые по ходу лежащие углы.

4. Измерение сторон теодолитного хода с помощью металлических лент или дальномеров дважды «туда» «обратно». Расхождение допускается 1/1000 – 1/2000, за окончательное значение принимается среднее. Вводят поправки за угол наклона (если он превышает 2°).

5. Камеральная обработка. Проверяют журналы измерений. Вычисляют координаты вершин теодолитного хода.

Уравнивание углов замкнутого теодолитного хода (полигона)

Сумма измеренных углов (рис. 57а) полигона («полая» - много, «гонус» - угол)

$$\sum_{i=1}^n \beta = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n$$

будет отличаться от теоретической суммы углов

$$\sum_{i=1}^n \beta_{теор} = 2d(n-2)$$

на величину невязки f_β , которая определяется из выражения

$$f_\beta = \sum_{i=1}^n \beta - \sum_{i=1}^n \beta_{теор}$$

согласно СН2/2 – 73 для промышленного строительства допустимую угловую невязку вычисляют по формуле

$$f_{доп} = \pm 1 \sqrt{n}$$

Если $f_\beta \leq f_{доп}$ исправляют значения углов введением поправки $V_\beta = -f_\beta/n$.

Если $f_\beta > f_{доп}$ то поправки вводят в углы с короткими сторонами.

Связь между дирекционными углами сторон и углами теодолитного хода

Из рис. 57(б) следует:

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

(47)

$$a_2 = a_1 + 180^\circ - \beta_2$$

.....

$$a_n = a_{n-1} + 180^\circ - \beta_n$$

Уравнивание углов разомкнутого теодолитного хода с твердыми дирекционными углами на концах.

Ход начинается и заканчивается на пунктах с известными координатами. Известны также a_n и a_k (рис.58).

$$a_1 = a_n + 180^\circ - \beta_1$$

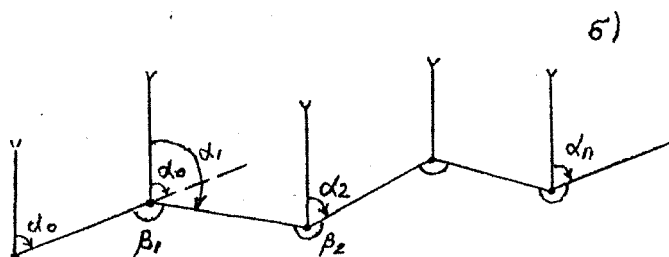
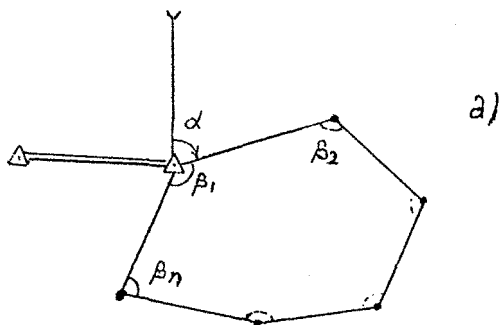


Рис. 57

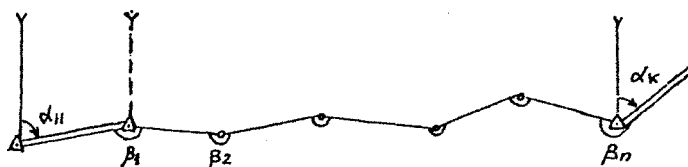


Рис. 58

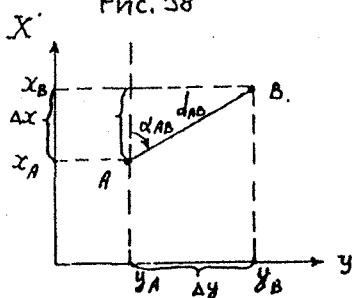


Рис. 59

$$\alpha_2 = \alpha_1 + 180^\circ - \beta_2 = \alpha_n + 2 \cdot 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2)$$

$$\alpha_n = \alpha_n + n \cdot 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n)$$

$$\text{или } \alpha_k = \alpha_n + n \cdot 180^\circ - \sum_1^n \beta_i,$$

отсюда

$$\text{теор} \sum_1^n \beta_i = \alpha_n - \alpha_k + n \cdot 180^\circ.$$

Сумма практически полученных углов отличается от теоретической на величину невязки

$$f_\beta = \sum_1^n \beta_{\text{пр}} - \text{теор} \sum_1^n \beta_i.$$

Допустимая невязка $f_\beta = \pm 1',5 \sqrt{n}$ или $f_\beta = 1' \sqrt{n}$, если ход опирается на пункты высших классов. Углы уравнивают введением поправки

Затем вычисляют дирекционные углы по формулам (47).

§ 41. Прямая геодезическая задача.

Определение координат (прямоугольных) точки по известным координатам другой точки, дирекционному углу и горизонтальному проложению между ними.

Дано: $X_A, Y_A, d_{AB}, \alpha_{AB}$.

Найти: X_B, Y_B .

Из чертежа (рис. 59)

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

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

$$\Delta X = d_{AB} \cdot \cos \alpha_{AB},$$

$$\Delta Y = d_{AB} \cdot \sin \alpha_{AB}.$$

При вычислениях знаки приращений будут зависеть от направления (α_{AB}).

§ 42. Обратная геодезическая задача.

По координатам двух точек найти дирекционный угол и расстояние между ними (горизонтальное проложение).

Дано: X_A, Y_A, X_B, Y_B .

Найти: d_{AB}, α_{AB} .

Из чертежа (рис. 59)

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

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

Следовательно $\operatorname{tg} \alpha_{AB} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$ и $d_{AB} = \frac{\Delta X}{\cos \alpha_{AB}}$; $d_{AB} = \frac{\Delta Y}{\sin \alpha_{AB}}$;

Для контроля вычислений пользуются формулой

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

§ 43. Уравнивание приращений координат замкнутого и разомкнутого теодолитного хода.

Суммы проекций сторон замкнутого многоугольника на координатные оси должны быть равны 0. Из рис. 60

$$\sum_{\text{теор}} \Delta X = 0, \quad \sum_{\text{пр}} \Delta X = f_x,$$

$$\sum_{\text{теор}} \Delta Y = 0, \quad \sum_{\text{пр}} \Delta Y = f_y.$$

Эти суммы обычно не равны 0, так как измерения сопровождаются ошибками.

Координаты точки *A* (начальной точки), вычисленные по ходу (рис. 61) не совпадут с известными координатами этой же точки.

Гипотенуза прямоугольного треугольника – линейная невязка:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}.$$

Ее выражают в относительной мере

$$\frac{f}{P} = \frac{f : f}{P : f} = \frac{1}{N}$$

алиquotная дробь, где *P* – периметр полигона.

В благоприятных условиях $\frac{1}{N} \leq \frac{1}{2000}$.

В средних условиях $\frac{1}{N} \leq \frac{1}{1500}$.

В неблагоприятных условиях $\frac{1}{N} \leq \frac{1}{1000}$.

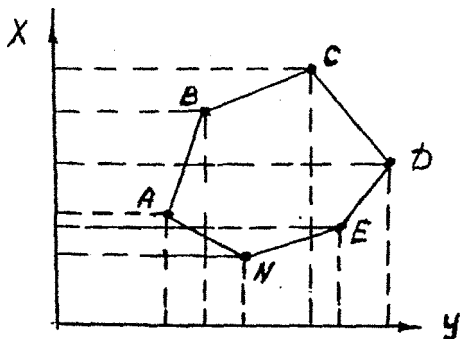


Рис. 60

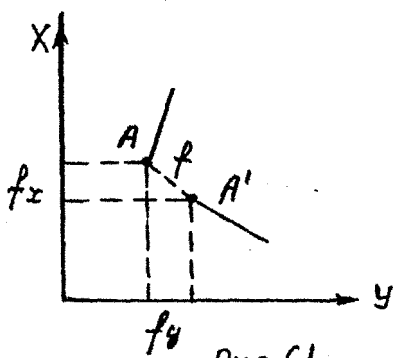


Рис. 61

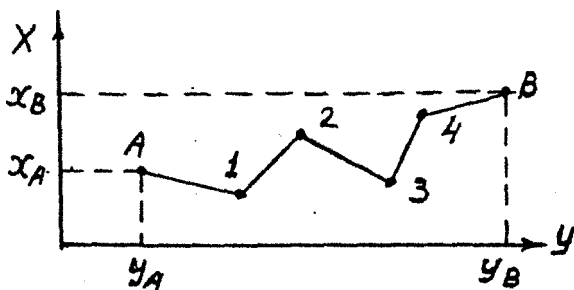


Рис. 62

Уравнение выполняют путем введения поправок в приращения пропорционально длинам сторон

$$\delta_{\pi} = \frac{-f_x}{P} \cdot d_i ; \quad \delta_y = \frac{-f_y}{P} \cdot d_i .$$

где d_i – длина стороны. Затем вычисляют координаты вершин, начиная от начальной.

Уравнивание приращений координат разомкнутого теодолитного хода

Ход проложен (рис. 62) из точки A в точку B для определения координат точек 1, 2, Координаты точек A и B известны. Следовательно можно определить теоретическую сумму приращений координат:

$$m_{теор} \sum \Delta X = X_B - X_A;$$

$$m_{теор} \sum \Delta Y = Y_B - Y_A.$$

Эти суммы сравнивают с суммами вычисленных приращений $\sum_{пр} \Delta X$ и $\sum_{пр} \Delta Y$ и вычисляют невязки:

$$f_x = \sum_{пр} \Delta X - m_{теор} \sum \Delta X;$$

$$f_y = \sum_{пр} \Delta Y - m_{теор} \sum \Delta Y.$$

Затем вычисляют линейную невязку, если $\frac{f}{P} \leq \frac{1}{1500}$ вычисляют поправки в приращения пропорционально длинам сторон, исправляют приращения и вычисляют координаты вершин хода.

В настоящее время для создания плановых и высотных геодезических сетей, как государственных, так и местных все шире используются методы глобального позиционирования с использованием спутниковых систем «ГЛОНАСС» и «GPS».

§ 44. Спутниковые системы определения местоположения объектов.

Спутниковые системы применяются для определения положения как подвижных объектов, так и для отдельных точек земной поверхности.

В этих системах выделяют три главные подсистемы (рис.63а): наземного контроля и управления (НКУ), группы спутников (космических аппаратов - КА), аппаратуры пользователей (АП).

В подсистему НКУ входят станции слежения за КА, службы точного времени, координационно – вычислительный центр (КВЦ) и станции загрузки данных на борт КА.

Спутники проходят над станциями слежения рис. 63 (1,2,3,4) дважды в сутки. В процессе прохождения спутника над станциями слежения непрерывно определяется расстояние от каждой станции слежения до спутника. Собранный информация поступает в КВЦ (5), обрабатывается и прогнозируются координаты спутников (эфемериды) на ближайшие 1 – 2

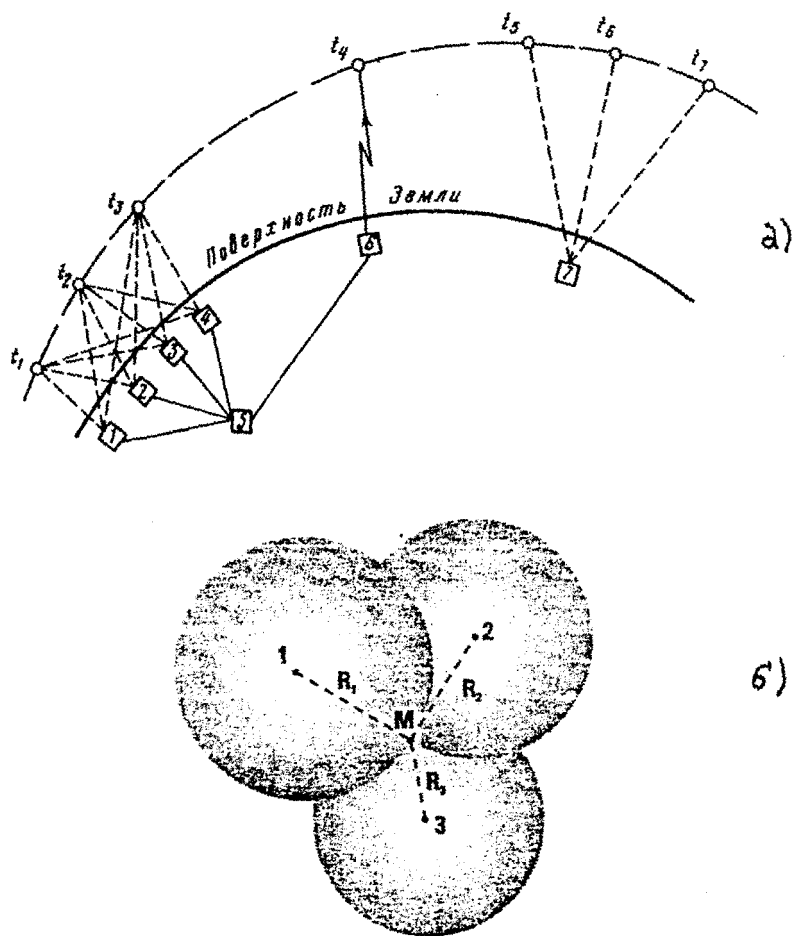


Рис. 63

оборота. Эти данные с наземной станции ввода (6) по радиоканалу загружаются на борт каждого КА.

В подсистему КА входят 24 спутника. Имеется еще 3 резервных спутника. Каждый спутник имеет атомные эталоны частоты и времени, аппаратуру для приема и передачи информации по радиоканалу, бортовой компьютер. КА сохраняет стабильным заданное положение на орбите, принимает и хранит информацию с наземной станции ввода, а также непрерывно передает в пространство измерительные радиосигналы, данные о точном времени, свои координаты и другие сведения.

Аппаратура пользователей АП (7) представляет собой приемные устройства определяющие расстояния от спутников до точки установки приемников.

В настоящее время в эксплуатации находятся две системы GPS – США и ГЛОНАСС – РФ Система GPS, полное название Global Position System, параллельное название NAVSTAR – Navigation Satellite Timing and Ranging.

ГЛОНАСС – Глобальная Навигационная Спутниковая Система.

Принцип определения местоположения.

В спутниковых системах определения местоположения КА играют роль геодезических опорных пунктов.

В каждый момент послышки спутником радиосигнала его координаты известны. Аппаратура пользователя принимает этот сигнал и по времени прохождения сигнала определяет расстояние до спутника на момент послышки сигнала.

Если с определяемого пункта M измерить расстояния R_1, R_2, R_3 (рис. 63 б) до трех пунктов 1, 2, 3 с известными координатами и провести из этих пунктов радиусами R_1, R_2, R_3 окружности, то эти сферы пересекутся в точках M и M_1 и определят их положение.

Точки M и M_1 расположены по разные стороны плоскости 1 2 3 и правильный выбор сделать просто. В этом и заключается геометрический принцип решения задачи.

Расстояния R (дальности) определяют в беззапросном режиме, когда передатчик на спутнике работает непрерывно, а спутниковый приемник пользователя включается на период измерений.

Для того чтобы правильно определить время распространения радиосигнала, шкалы времени на спутнике и в приемнике должны быть строго согласованы. На самом деле такое согласование шкал времени отсутствует. Т.е. часы приемника не сверены с часами спутника, поэтому измеряются искаженные расстояния. Эти измеренные расстояния называют псевдодальностями. Измерения расстояний до всех КА, с которыми в данный момент работает приемник, происходит одновременно. Следовательно, для всех измерений величину временного несоответствия можно считать постоянной. С математической точки зрения это означает, что неизвестными являются не только координаты X, Y, H , но и поправка часов приемника Δt . Для определения этих неизвестных необходимо измерить псевдодальности не до трех, а до четырех спутников. В результате обработки проведенных измерений в приемнике вычисляются координаты X, Y, H и точное время.

Если приемник установлен на движущемся объекте и одновременно с псевдодальностями

измеряет доплеровские сдвиги частот радиосигналов, то можно вычислить и скорость объекта. Таким образом, для навигационных определений необходимо обеспечить наблюдения как минимум четырех спутников. Избыточные измерения (сверх четырех) позволяют повысить точность определения координат.

Созвездия спутников.

Орбитальные группировки GPS и ГЛОНАСС состоят из 24 спутников. Спутники в GPS находятся на 6 орбитах. Плоскости орбит наклонены на угол около 55° к плоскости экватора и образуют между собой углы по 60° .

В ГЛОНАСС спутники находятся в трех плоскостях, образующих между собой углы по 120° , наклон орбит спутников к плоскости экватора $64,8^\circ$. В таблице 15 приведены орбитальные параметры ГЛОНАСС и GPS.

Таблица 15

Параметры	ГЛОНАСС	GPS
Число КА в системе	24(3)	24(3)
Число орбитальных плоскостей	3	6
Наклон орбиты i	$64,8^\circ$	55°
Период обращения	11 ч 16 мин	11 ч 57 мин
Высота КА	19 100 км	20 150 км

Эксцентриситет орбит около 0,001 – 0,01, т.е. орбиты практически круговые.

Способы позиционирования

Автономное определение координат. В этом методе координаты определяют пространственной линейной засечкой по кодовым псевдодалностям, измеренным до четырех и более спутников.

Способ автономный так как наблюдатель определяет местоположение независимо от наблюдений на других станциях. При однократных измерениях координат средняя квадратическая погрешность $\pm 7,5$ м.

Точность автономного позиционирования можно повысить продолжительными (10 – 15 минут) наблюдениями на точке.

Дифференциальный способ основан на одновременных измерениях двумя приемниками. Один приемник устанавливается на пункте с известными координатами. Этот пункт называют базовой станцией. Другой приемник подвижный помещают на точке, координаты которой определяют. Так как координаты базовой станции известны, их сравнивают с определяемыми по спутникам и таким образом определяют поправки для подвижной станции. С одной базовой станцией могут одновременно работать несколько подвижных приемников.

Для передачи поправок используются средневолновый и УКВ диапазоны. При удалении подвижного приемника от базовой станции до 10 км точность определения координат точек $1 - 2$ см в плане и примерно 3 см по высоте.

Глава 6

Топографические съемки

Комплекс работ, выполняемых на местности для составления планов и карт, называется съемкой. Съемку с целью определения взаимного положения объектов местности в плане называют контурной или горизонтальной. В том случае, когда снимаются ситуация и рельеф, съемку называют топографической.

Различают следующие виды съемок: теодолитную, тахеометрическую, фототопографическую и сканерную. Фототопографическая съемка разделяется на аэрофотосъемку и наземную фототеодолитную съемку.

Съемка выполняется в соответствии с действующими инструкциями общеобязательными для государственных топографических съемок и ведомственными инструкциями для съемок специального назначения.

§ 45. Теодолитная съемка.

Целью теодолитной съемки (горизонтальной) является получение контурного плана местности. Плановым обоснованием этой съемки служат теодолитные ходы. Измерения при съемке выполняют теодолитом, мерной лентой, рулеткой (или дальномерами с точностью $1/1500 - 1/2000$).

Способы съемки

1. Способ прямоугольных координат (способ перпендикуляров).

Линию AB (рис. 64) принимают за ось абсцисс, измеряют d_c и d_c' , d_c и d_c' . Для построения перпендикуляров используют теодолит или экер, а небольшие перпендикуляры строят на глаз.

2. Способ полярных координат. Точку B (рис. 65) принимают за полюс. Устанавливают теодолит и измеряют полярные углы β и расстояния d .

3. Способ угловых засечек. Измеряют два угла (рис. 66) в точках теодолитного хода на определяемую точку A .

4. Способ линейных засечек. Здесь измеряют расстояния от опорных точек до определяемой. Оптимальный случай, когда углы в треугольнике близки к 60° . Не допускаются углы при т.А менее 30° и более 150° (рис. 67).

Результаты съемки заносятся в абрис – чертёж, сделанный в поле от руки.

Используя в качестве основы точки теодолитного хода по данным абриса, наносят на план контуры. Оформляют план в соответствии с действующими условными знаками.

§ 46. Тахеометрическая съемка.

Тахеометр – прибор, с помощью которого измеряют горизонтальные углы, расстояния и превышения.

Цель съемки – получение топографического плана (то есть плана с контурами и горизонталями).

Съемочным обоснованием тахеометрической съемки являются:

1. Теодолитно – нивелирные ходы.

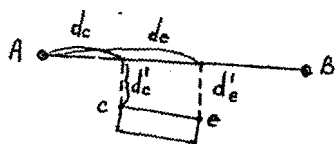


Рис. 64

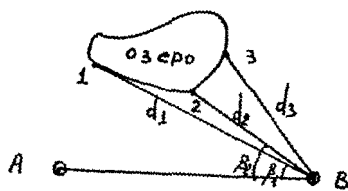


Рис. 65

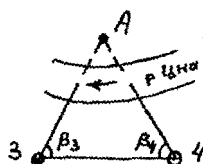


Рис. 66

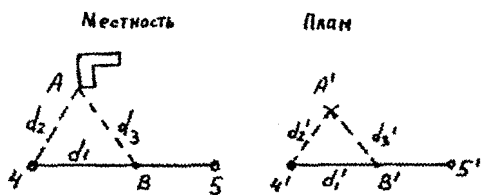


Рис. 67

2. Высотные теодолитные ходы.

3. Тахеометрические ходы.

Идея тахеометрической съемки.

Плановое положение точек получают полярным способом (рис. 68), измеряя полярный угол β по горизонтальному кругу теодолита, а расстояние D с помощью нитяного дальномера. Одновременно измеряют угол наклона ν по вертикальному кругу теодолита, чтобы определить d и h .

В качестве опорных точек (станций), с которых ведется съемка, могут быть использованы пункты государственной геодезической сети, сети сгущения, а также съемочной геодезической сети. Последняя для тахеометрической съемки может быть выполнена в виде теодолитно – нивелирных ходов (плановое положение точек определяют по методике проложения теодолитных ходов, а высоты точек из геометрического нивелирования); теодолитно – высотных ходов, в которых высоты определяют из тригонометрического нивелирования; и тахеометрических ходов, отличающихся от предыдущих тем, что здесь измерения выполняют электронными тахеометрами.

Порядок работы

Устанавливают теодолит в точке B (рис. 68), ориентируют и закрепляют лимб, измеряют высоту прибора над точкой установки. По рейке, установленной на точке местности, с помощью нитяного дальномера определяют расстояние D , измеряют по горизонтальному кругу угол β , а по вертикальному кругу угол ν .

Превышение h вычисляют по формуле тригонометрического нивелирования:

$$h = d \cdot \operatorname{tg} \nu + a - l.$$

Результаты измерений на каждую точку заносят вместе с номером точки в журнал тахеометрической съемки.

Точки, в которых устанавливают рейку, выбирают таким образом, чтобы при минимальном их количестве правильно изобразить на плане ситуацию и рельеф.

В ходе работы на станции составляется и ведется абрис (рис. 69), на котором показывают станцию, направление ориентирования горизонтального круга, ситуацию и расположение снимаемых точек. Рельеф изображают либо условными горизонталями либо стрелками, соединяющими речные точки, между которыми уклон местности не меняется.

По завершению съемки на станции проверяют правильность ориентирования горизонтального круга, для чего повторно визируют на исходное направление. Расхождение в отсчетах не должно быть более $2'$.

Во избежание больших переделок рекомендуется в процессе работы на станции такой контроль выполнять через 10 – 15 точек с фиксацией контроля.

План тахеометрической съемки вычерчивается в следующей последовательности: строится координатная сетка, затем по координатам наносятся точки съемочного обоснования. После этого с помощью транспортира и масштабной линейки наносятся пикетные точки полярным способом.

Рельеф местности изображается горизонталями, положение которых на плане

определяется методом графического интерполирования, например, следующим образом: на листе прозрачной бумаги (кальке) проводятся параллельные линии на произвольных, но одинаковых расстояниях друг от друга. Эти линии подписываются в соответствии с принятой высотой сечения рельефа.

Для интерполирования (рис. 70) по линии AB кальку накладывают на план таким образом, чтобы точки A и B заняли положение между параллельными линиями, соответствующие их высотам. После этого на план перекладывают все точки k, l, m, n пересечения линий на кальке с линией AB и подписывают их. Выполнив на плане интерполяцию по всем остальным направлениям, отмеченным на абрисе, получают положение точек с известными высотами. Точки с одинаковыми высотами соединяют плавными линиями и получают таким образом на плане положение горизонталей.

§ 47. Электронные тахеометры.

В настоящее время в практике геодезических работ получили широкое применение приборы, сочетающие в себе цифровой теодолит, электронный дальномер, компьютер и программное обеспечение по обработке результатов измерений. В этих приборах имеется также запоминающий блок, накапливающий всю полученную информацию.

Электронный тахеометр последнего поколения имеет встроенный лазерный безотражательный дальномер, позволяющий определять координаты любой точки местности (или объекта), на которую наведена труба. При работе с отражателем для облегчения наведения на установленный отражатель используются сервоприводы, а сам процесс наведения на отражатель осуществляется автоматически. Таким образом присутствие наблюдателя у прибора становится необязательным.

Геодезист устанавливает тахеометр на станции, приводит его в рабочее положение. Затем вводит в процессор координаты точки стояния, значение дирекционного угла при наведенной трубе на соседнюю станцию и прибор готов к работе. В другом варианте прибор устанавливают в удобном для работы месте, наводят трубу последовательно на три точки, координаты которых известны и внесены в память компьютера и измеряют направления и расстояния до этих точек. Положение точки стояния определяется обратный угловой и линейной засечкам с этих трех точек.

Специалист, ведущий топографическую съемку, устанавливает отражатель в точке местности. Тахеометр находит отражатель, определяет его координаты (координаты точки) и по сигналу топографа запоминает номер точки, координаты и ее код (обозначение, например угол дома, люк канализации и т.д.)

Если необходимо координаты снимаемой точки можно получить по радиоканалу и в точке установки отражателя. Для этого на штанге отражателя закреплен пульт с дисплеем.

Электронные тахеометры – универсальные приборы, их можно применять при создании планово – высотного обоснования съемки, в процессе тахеометрической съемки, а также при выполнении разбивочных работ.

Лазерные тахеометры

Оформился новый класс тахеометров – лазерные тахеометры.

Более правильно называть их тахеометры с безотражательным лазерным дальномером. С появлением лазерной рулетки возникла идея объединить ее с тахеометром. На первом этапе лазерную рулетку с помощью специального кронштейна закрепляли на трубе теодолита. В зависимости от способа закрепления возможны два решения. Луч лазера направлялся параллельно визирной оси в вертикальной плоскости или параллельно визирной оси в плоскости перпендикулярной оси вращения трубы. Такие решения были вынужденными и создавали определенные затруднения, связанные с необходимостью редукции результатов измерений, а также с тем, что при выполнении измерений безотражательным методом могли возникать ошибки, связанные с разнесением визирной оси и оси лазерного луча.

Разработанные лазерные тахеометры имеют лазерный безотражательный дальномер, лазерный пучок которого совмещен с визирной осью трубы. Работа с таким тахеометром возможна как в безотражательном режиме так и с отражателем. В последнем случае дальность действия прибора значительно возрастает.

Таблица 16 Электронные тахеометры

Технические характеристики	SET 4110 R SOKKIA Япония	ELTA ^(R) C Zeiss Германия	NIKON DTM – 450 Япония	Trimble 5601 США
Ошибка угл.изм., "	5	2/3	5	1
Компесатор наклона оси вращения	2 - осевой	2 - осевой	1 - осевой	–
Рабочий диапазон	3'	5'	3'	–
Ошибка линейных Измерений мм + мм/км	5 + 3	2 + 2	2 + 2	2 + 2
Время измерений С	–	–	–	–
Дальность с одним отражателем, м	1000	2500	2700	2500
Максимальная, м	4000	3000	4400	3500
Безотражательн., м	100	–	–	600
Клавиатура (число клавиш)	28	28	15	27
Масса прибора, кг	5,6	6,2	6,2	7,5

Выпускаются две модели : AUTLOCK – автонаведение на отражатель и отслеживание его до 2200 м; ROBOTIC – роботизация измерений в одиночку (связь точки установки отражателя с тахеометром по радиоканалу).

§ 48. Лазерное сканирование.

Лазерные сканеры – приборы для топографической съемки, а также для съемки различных техногенных объектов. В результате лазерного сканирования получают массив пространственных координат точек снимаемого объекта. Расстояние до каждой точки определяется безотражательным дальномером. Помимо расстояния каждой точке соответствует свой горизонтальный угол и угол наклона, регистрируется также интенсивность отраженного луча. Полученные данные позволяют построить пространственную модель и изображение снимаемого объекта в заданной системе координат с точностью определения координат любой точки модели порядка ± 3 мм. Тем не менее, для облегчения работы с полученной моделью объекта в некоторых сканерах имеются цифровые камеры, позволяющие получить изображение в реальных цветах. Разработаны сканеры для воздушной и наземной съемки.

В настоящее время можно выделить два типа наземных лазерных сканеров: специально разработанные сканеры, в которых сканирование осуществляется подвижными оптическими элементами и сканеры, созданные на базе безотражательного электронного тахеометра с сервоприводами. Детальность съемки в обоих типах приборов задается шагом сканирования.

В таблице 17 приведены основные характеристики некоторых наземных лазерных сканеров.

Таблица 17

Название системы (компания - производитель)	Дальность до сканир. объекта, м	Точность мм / расст. м	Угол поля зрения в горизонт. И верт. плоскости	Время сканирования, мин	Рабочие температуры	Класс безопасности
Callidus 1,1 (Callidus)	0,15 - 150	5/32	360°x180°	4 - 9	0 - +40°C	Class1
Сурах 2500 (Сура Technologies)	1,5 - 100	4/50	40° x 40°	10	0 - +40°C	Class2
ILRIS - 30 (Ortech)	2 - 350 при 4% отражен. 2 - 800 при 20% отражен.	10/100	40° x 40°	8	-20 - +50°C	Class1
SOISIC (MENS)	0,8 - 40	0,5/5	46° x 320°	15	+5 - +40°C	Class 3A

RIEGL LMS - 2210	2 - 350	25/200	330° x 80°	0,5	0 - +40°C	Class I
RIEGL LMS - 2360	2 - 200	6/200	360° x 90°	0,5	0 - +40°C	Class I
RIEGL LMS - 2420	2 - 1000	20/1000	360° x 80°	до 2	-20 - +50°C	Class I
RIEGL LPM - 25 HA	1 - 40	8/20	180° x 150°	2	+5 - +40°C	Class I
Laser Ase (R) Scanner «Leica»	до 700 м	50/700	360° x	250 точек/сек		Class I

§ 49. Топографическая съемка акваторий.

30 апреля 1982 г. принята конвенция ООН по морскому праву. Это единый всеобъемлющий международно - правовой документ, регламентирующий основные вопросы деятельности в водах Мирового океана, на морском дне и в его недрах.

Выход за рамки конвенции, как международно - правовой основы, недопустим, неправомерен, а в некоторых ситуациях преступен, так как чреват международными конфликтами. Сказанное относится ко всем видам научных исследований на море, включая топографо - геодезические исследования. Проведение топографо - геодезических исследований необходимо для обеспечения работ, связанных с разведкой и разработкой ресурсов океана, работ по делимитации морских пространств, демаркации морских граничных линий и др.

Основные положения конвенции, регламентирующие правовой статус и назначение топографических работ на акваториях Мирового океана следующие.

Нормальная исходная линия - это линия наибольшего отлива вдоль берега, указанная на официально признанных прибрежным государством морских картах крупного масштаба.

Прямая исходная линия - прямая линия, соединяющая законодательно установленные прибрежным государством точки на выдающихся в море оконечностях его побережья, включая расположенные в непосредственной близости от него (на расстоянии, не превышающем ширины территориального моря) цепи островов и осыхающие при отливе возвышенности.

Исходные линии (ИЛ) используются для отсчета ширины территориального моря, исключительной экономической зоны и континентального шельфа прибрежного государства, причем прямые ИЛ используются в этих целях, когда береговая линия глубоко изрезана и

извилиста.

Территориальное море (ТМ) – морской пояс за пределами сухопутной территории и внутренних вод (бухт, заливов, устьев рек и пр.) прибрежного государства. На ТМ, равно как и на воздушное пространство над ним, его дно и недра, прибрежное государство осуществляет суверенитет. Внешней границей ТМ является линия, каждая точка которой находится от ближайшей точки ИЛ на расстоянии, равном ширине ТМ. Ширина ТМ устанавливается в пределах, не превышающих 12 морских миль.

Исключительная экономическая зона (ИЭЗ) – район открытого моря, находящийся за пределами ТМ и прилегающий к нему. В ИЭЗ прибрежное государство осуществляет: суверенные права в целях разведки, разработки и сохранения природных ресурсов в водах, покрывающих морское дно, на морском дне и в его недрах; юрисдикцию в отношении создания и использования искусственных островов, установок и сооружений, морских научных исследований, защиты среды. Ширина ИЭЗ не должна превышать 200 морских миль, отсчитываемых от ИЛ.

Исходные линии, а также внешние границы ТМ и ИЭЗ указываются на изданных прибрежным государством картах таких масштабов, которые приемлемы для точного установления их положения. Карты можно заменять перечнем географических координат точек с указанием исходных геодезических данных. Копии карт или перечней прибрежное государство сдает на хранение Генеральному секретарю ООН.

Континентальный шельф (КШ) прибрежного государства включает в себя морское дно и недра подводных районов, простирающихся за пределами его ТМ до внешней границы подводной окраины материка или на расстояние 200 морских миль от ИЛ, когда внешняя граница подводной окраины материка (континентальной окраины) не простирается на такое расстояние.

Границы КШ за пределами 200 морских миль от ИЛ устанавливаются на основе рекомендации Комиссии по границам континентального шельфа. Комиссия вырабатывает рекомендации на основе данных о границах КШ, которые будут предоставляться ей прибрежным государством в течение 10 лет с момента вступления в силу конвенции. Карты и геодезическую информацию, перманентно описывающую внешнюю границу КШ, прибрежное государство сдает на хранение Генеральному секретарю ООН.

Прибрежное государство осуществляет над КШ суверенные права в целях разведки и разработки его природных ресурсов. Отмеченные права не затрагивают статуса покрывающих вод и воздушного пространства над ними. Осуществление прав прибрежного государства в отношении КШ не должно ущемлять также осуществление судоходства, прокладку кабелей и трубопроводов другими государствами. Кроме того, за пределами 200 морских миль от ИЛ оно не может по своему усмотрению отказать другим государствам в согласии на проведение ими научных исследований.

Открытое море (ОМ) – морское пространство, которое не входит ни в ТМ, ни в ИЭЗ. Основу правового режима ОМ составляет принцип свободы открытого моря. Это означает, что оно открыто для общего равного и свободного пользования всеми государствами.

Район – дно морей и океанов и их недра за пределами национальной юрисдикции. Район открыт для использования исключительно в мирных целях.

Деятельность в Районе – все виды деятельности по разведке и разработке ресурсов Района. Деятельность в районе осуществляется на благо всего человечества.

Ресурсы – все твердые, жидкие или газообразные минеральные ресурсы, включая полиметаллические конкреции в Районе. Ресурсы, извлеченные из Района, рассматриваются как полезные ископаемые. Район и его ресурсы являются общим наследием человечества. Все права на ресурсы Района принадлежат всему человечеству, от имени которого действует «Орган».

«Орган» – Международный орган по морскому дну, организующий и контролирующей деятельность в Районе. Орган регулирует освоение ресурсов Района в целях развития мировой экономики и сбалансированного роста международной торговли.

В задачу съемки входит получение в необходимом объеме и с заданной точностью количественных и качественных данных для построения топографической карты или иной картографической модели снимаемой акватории.

Количественные данные передают рельеф морского дна, плановое и высотное положение инженерных сооружений и коммуникаций, положение границ морских пространств и зон, распространение донных отложений (грунтов), растительности, гидрофизические параметры. В количественном отношении характеризуются литологические особенности грунтов, ландшафтно – экологическое состояние района, распространение донных организмов (фито – и зообентос), виды растительности и т.д.

Особенности съемки обусловлены нестационарностью водных масс по всей их толще, особенностью электрофизических свойств воды (ее непрозрачностью для большей части спектра электромагнитных волн), невозможностью визуального обзора снимаемых объектов.

Донный рельеф – основной элемент ситуации, изображаемый на топографических картах акваторий. Методы съемки донного рельефа – это промер, площадная гидрологическая съемка и дистанционное зондирование.

Промер – метод съемки донного рельефа путем непосредственного и косвенного измерения глубин на галсах, регулярной сеткой покрывающих снимаемую акваторию. Расстояние между съемочными галсами (междугалсовое расстояние) – один из основных параметров промера, объединяемый часто с понятием подробность промера. *Подробность промера* устанавливается с учетом общего характера и расчлененности рельефа. С уменьшением междугалсового расстояния (до некоторого оптимального значения) повышается подробность съемки.

По мере выявления особенностей рельефа донной поверхности, в процессе проведения промера, галсы сгущают в тех местах, где в этом есть необходимость.

Съемочные работы выполняют в масштабах 1: 2 000 – 1: 50 000. Для районов шельфа с глубинами свыше 200 м допускается выполнять съемку в масштабе 1: 100 000.

Подробность съемки должна обеспечивать соблюдение принятых требований к достоверности и точности изображения рельефа горизонталями в масштабе создаваемой карты.

На первично создаваемых картах средние погрешности в положении горизонталей, относительно высотной основы, не должны превышать $2/3$ величины сечения рельефа дна с углами наклона до 6° и целой высоты сечения – на участках с углами наклона от 6 до 20° .

Подробность промера устанавливается в зависимости от глубины и вертикальной расчлененности рельефа в соответствии с данными табл. 18.

Таблица 18

Рекомендуемая частота промеров

Глубина, м	Категория рельефа		
	Нерасчлененные и слабо расчлененные равнины со средними значениями относительной глубины врезов 3 – 10 м.	Расчлененные равнины с относительной глубиной врезов 10 – 50 м.	Расчлененные равнины с относительной глубиной врезов более 50 м
Междугалсовые расстояния, км			
0 – 20	0,25 – 0,50	0,10 – 0,25	0,05 – 0,10
20 – 50	0,50 – 0,75	0,25 – 0,50	0,10 – 0,15
50 – 100	0,75 – 1,0	0,50 – 0,75	0,15 – 0,20
100 – 200	1,0 – 1,25	0,75 – 1,0	0,20 – 0,25
200 – 500	1,25 – 2,0	1,0 – 1,25	0,25 – 0,50

Подробность промера зависит от масштаба создаваемой карты. Установлены средние значения междугалсовых расстояний 20, 50, 100, 250 и 500 м для масштабов 1:2 000, 1:5 000, 1: 10 000; 1:25 000 и 1:50 000 соответственно. Максимально допустимое расстояние между галсами – 2 см в масштабе карты, минимальное – 0,5 см, среднее – 1 см.

Геодезическим обоснованием съемки акватории служит специальная сеть, создаваемая вдоль побережья, опирающаяся на пункты государственной сети. Методы создания планового обоснования различные – триангуляция, полигонометрия, трилатерация, прямые и обратные засечки и их комбинации. Пункты обоснования закрепляются бетонными монолитами и обозначаются на местности сигналами, пирамидами или турами из камней.

На небольших удалениях от берега, в пределах прибрежной зоны (до 10 км) положение промерных точек определяется прямой геодезической засечкой двумя теодолитами. На значительном удалении промерного судна от берега его положение определяют радиогодезическими системами (РГС).

При планировании промерных работ необходимо обращать внимание на то, чтобы углы пересечения направлений с опорных точек (в прямой геодезической засечке) или углы пересечения изофазных гипербол при работе с РГС лежали в пределах от 30 до 150° .

Если плановое положение судна определяется прямой геодезической засечкой, съемочные галсы прокладывают в виде прямых линий, параллельных берегу, а при использовании РГС галсы прокладывают в виде дуг окружностей, соединенных между собой. Привязка галсов

производится к углам оснований вышек, отдельно стоящим сваям, вехам, координаты которых известны с ошибкой не более 1 м. Ошибка определения координат промерных точек радиогодезической системой «Поиск» составляет не более 10 м, а ошибка определения координат методом прямой засечки – 1–2 м.

Непосредственные измерения в процессе выполнения промера производят наметкой и ручным лотом при глубинах до 5 и 20 м соответственно. Точность измерений зависит от типа грунта, наличия растительности, течений, волнений и характеризуется ошибками 5–10 см на глубинах до 5 м и 10–20 см – на больших глубинах. Для косвенного измерения глубин используются эхолоты. Эхолотом называется прибор, измеряющий глубину посредством измерения времени распространения акустического сигнала от судна до дна водоема и обратно.

Глубина водоема h (рис. 69) определяется как сумма глубины h_1 водоема под излучающей И и принимающей П антеннами эхолота и углубления этих антенн Δ от поверхности водоема.

Глубина водоема определяется по формуле

$$h = 0,5\sqrt{(c \cdot t)^2 - l^2} + \Delta,$$

где l – расстояние между передающей и приемной антеннами;

где c – скорость распространения звука в воде, t – время прохождения звуковым импульсом расстояния до дна водоема и обратно.

В большинстве современных эхолотов приемная и передающая антенна совмещены и поэтому для определения глубины используется формула

$$h = 0,5 c t + \Delta, \text{ где } \Delta \text{ – глубина погружения антенны.}$$

Скорость распространения звука в воде изменяется в пределах

$$c = 1466 - 1548 \text{ м/с, на ее величину влияют температура, глубина и соленость воды.}$$

Появление в воде пузырьков воздуха (под влиянием ветра и волнения, движения судна с большой скоростью) может вызывать перебои в работе эхолота или погрешности в его показаниях.

В настоящее время прямоугольные координаты (x , y) точки промера определяют с помощью GPS приемника, устанавливаемого на судне, а при небольших удалениях от берега электронным тахометром. Электронный тахометр устанавливают на берегу, а на судне устанавливают отражатель.

Эхолот позволяет получать профиль дна по направлению движения судна. Для съемки заданной акватории прокладывают несколько галсов с требуемой частотой между галсами.

При обследовании мелководных участков со сложным рельефом дна требуется более подробная информация о ситуации под водой. В этих случаях применяют многолучевые эхолоты.

Конструктивно такие системы могут быть выполнены; в виде набора нескольких однолучевых эхолотов, разнесенных в горизонтальной плоскости и одновременно измеряющих расстояния до дна по вертикали в нескольких точках; в виде сканирующего эхолота, измеряющего последовательно от места положения его антенны до дна в различных направлениях под известными углами, что позволяет вычислить глубину не только под

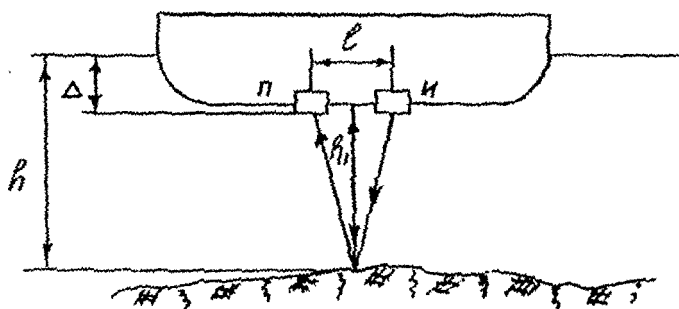


Рис. 69

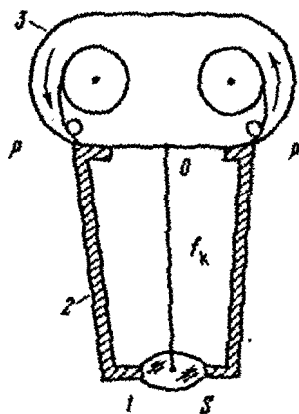


Рис. 70. Схема топографического ЛФА

плавсредством, но и в стороне, на расстояниях в 2 – 3 раза превышающих эту глубину; в виде нескольких эхолотов, антенны которых располагаются в одной точке, но фиксированы под разными углами к вертикали, что позволяет одновременно измерять расстояние до дна и вычислять глубину в ряде точек под судном и на расстояниях в 2-3 раза превышающих эту глубину.

Фирма Simrad производит профилирующий сканирующий многолучевой гидролокатор SM 2000P Multibeam Profiling Sonar, который включает в себя сканирующую антенну, совмещенную с подводным электронным блоком и судовую ПЭВМ. Сканирование происходит в секторе 120° по 128 направлениям при ширине сканирующего луча $1,5^\circ$ или 3° .

Эхолоты характеризуются: дальностью действия – мелководные (для глубин $h < 500$ м), среднеглубинные ($h < 5000$ м), глубоководные (h до 10 000 – 12 000 м); числом рабочих диапазонов измерения глубин – однодиапазонные и многодиапазонные; числом рабочих частот – одночастотные и многочастотные; числом формируемых зондирующих лучей – однолучевые и многолучевые; шириной характеристики направленности (ХН) акустических антенн – узколучевые (ХН $< 10^\circ$), широколучевые (ХН $> 10^\circ$); видом представления и способом регистрации результатов измерений – аналоговые с самописцем и цифровые с ЦУГ – (цифровыми указателями глубин); пространственной ориентацией оси ХН – эхолоты со стабилизированным излучением и эхолоты с нестабилизированным излучением.

Типовая структурная схема эхолота включает в себя излучающий, приемный и измерительный тракты, блоки регистрации и индикации, устройства управления и синхронизации.

Излучающий тракт состоит из формирователя зондирующего акустического сигнала и передающей антенны. *Зондирующий сигнал* – это периодическая последовательность прямоугольных импульсов с тональным заполнением, мощность и длительность которых устанавливается в соответствии с измеряемой глубиной. Рабочие частоты акустического излучения выбирают с учетом глубины действия прибора, требуемой разрешающей способности, уровня и спектра акустических помех (в современных эхолотах частота заполняющих импульсов обычно равна 10 – 300 кГц). Временная длительность импульсов обычно равна 10^{-2} – 10^{-3} с и варьируется под условием обеспечения необходимой разрешающей способности во всех диапазонах измерений. Частота их следования, как правило, не превышает 500 имп/с в режиме измерения глубин на мелководье и уменьшается до нескольких импульсов в секунду по мере увеличения диапазона измеряемых глубин до максимальных их значений.

В табл. 19 приведены основные характеристики отечественных эхолотов ряда НЭЛ – М.

Таблица 19

Характеристика эхолотов

Характеристика	НЭЛ – М1	НЭЛ – М2	НЭЛ – М3А	НЭЛ – М4
Пределы измерений, м	1 - 6000	1 - 3000	0,2 - 200	0,2 - 36
Максимальная скорость носителя, узлы	35	30	40	25
Аппаратурная средняя квадратическая ошибка, м:				
по самописцу при $h < 20$	0,1	0,1	0,1	0,1
$h > 20$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	-	$1,5 \cdot 10^{-2}$	-
по цифровому указателю глубин				
при $h < 20$	0,07	0,07	0,07	0,07
при $h > 20$	$10^{-2} h$	$10^{-2} h$	$10^{-2} h$	$10^{-2} h$
Допустимая качка, градус:				
килевая	3	3	3	3
бортовая	10	10	10	10
Количество частот	2 (ВЧ, НЧ)	2 (ВЧ, НЧ)	1(ВЧ)	1(ВЧ)
Расчетная скорость звука, м/с	1460 - 1530	1460 - 1530	1500	1500

Грунтовая съемка – важная часть съемки акваторий. Она выполняется для изображения на топографических картах литологического типа, площадного распространения и других характеристик донных отложений. При возведении морских сооружений придается большое значение достоверности отображаемой на картах акваторий геологической ситуации.

Сбор необходимой геологической информации рекомендуется производить отбором донных проб и методом гидролокационного обследования с помощью гидролокаторов бокового обзора, низкочастотных эхолотов и профилографов. Для съемки мелководий привлекаются материалы аэрофотосъемки и космические снимки.

Обнаружение и определение местоположения подводных трубопроводов, кабелей связи, устьев скважин, затонувших кораблей и других объектов искусственного происхождения возможно оптическим, фототелевизионным, гидроакустическим и электромагнитным методами.

Если позволяет прозрачность воды, применяют первые два метода. Более надежными являются гидроакустический и электромагнитный методы. Разработан искатель подводных трубопроводов ИПТ, на основе индукционного метода поиска и обнаружения. Прибор работает на глубинах до 10 м и позволяет определять плановое и высотное положение точек трубопровода с ошибкой ~ 2 м относительно носителя.

Уровенные наблюдения. В глобальном масштабе наблюдения за колебаниями уровня моря выполняет международный орган, именуемый Постоянной службой среднего уровня моря. Банк данных службы содержит ряды месячных и годовых средних уровней для более чем 1 000

пунктов, из которых на 389 пунктах наблюдения ведутся более 20 лет, а на 112 – с прошлого века.

На акваториях морей и океанов России равномерные наблюдения выполняются Госкомгидрометом. На Балтийском море равномерные наблюдения начались в 1703 г. по указу Петра I. Регулярные наблюдения ведутся в военной гавани Кронштадта с 1804 г. С 1825 г. наблюдения обрабатываются для получения высотного положения среднего уровня.

Работы по изучению и прогнозированию колебаний уровня в прибрежной зоне и открытом море выполняются на уровневых постах, аппаратурной основой которых являются равномерные устройства. По назначению и длительности действия уровеньные посты подразделяют на постоянные, дополнительные и временные; по месту установки – на береговые и посты открытого моря; по типу измерительных и регистрирующих устройств – на речные, свайные и посты с самописцами. Посты открытого моря, по способу хранения и передачи измерительной информации, делят на автономные и телеметрические.

При топографической съемке акваторий уровеньные наблюдения выполняют в целях выявления текущих колебаний уровня в процессе съемки, учета их при определении высоты мгновенного рабочего уровня водной поверхности в районе работ и приведения результатов промерных измерений к единому нулю глубин или высот. В предусмотренных техническими проектами случаях уровеньные наблюдения во время съемки могут выполняться также для определения высоты наименьшего теоретического уровня, накопления данных о многолетнем среднем уровне, передачи абсолютной высоты на острова и другие объекты побережья. Амплитуда приливов зависит от конфигурации береговой линии и глубины в прибрежной зоне. Максимальным для Мирового океана является прилив в 16,2 м, наблюдаемый в вершине залива Фунди (Новая Шотландия). В открытом океане у островов с приглубыми берегами величина прилива составляет в среднем 0,8 – 1,0 м. Для акваторий шельфа России максимальным является прилив 13,0 м у Астрономического мыса в Пенжинской губе Охотского моря. У берегов Северного Ледовитого океана приливы не превышают 0,8 – 1,2 м, на Балтийском море – 3–5 см. Высотная опорная сеть, применяемая в России для измерений уровня моря, включает фундаментальный репер, основной репер уровеньного поста, привязываемый нивелированием I или II класса к фундаментальному реперу, контрольный (рабочий) репер, связанный нивелированием IV класса с основным репером, и уровеньную рейку, привязываемую нивелированием IV класса к рабочему реперу. Такая схема построения сети в совокупности с методикой привязки дает возможность из обработки 25 – летних наблюдений получить значение уровня воды со средней квадратической ошибкой, отнесенной к однолетнему периоду наблюдений, 0,5 мм.

Поверхность многих морей России в течение 8 – 10 месяцев покрыта льдом, поэтому промерные работы на них ведут с поверхности льда с помощью эхолотов, установленных на вездеходах. Для этого с помощью буровых станков во льду бурят лунки.

Помимо промера глубин при изучении шельфа выполняются геофизические съемки (магнитная, гравиметрическая, сейсмическая), измеряются скорости морских течений, берутся пробы грунта.

Основной масштаб топографических карт шельфа – 1:25 000, районы освоения и разработки месторождений полезных ископаемых снимают в масштабах 1:10 000, 1: 5 000. на труднодоступные районы арктических морей составляются карты масштаба 1: 50 000.

§ 50. Элементы аэрофототопографической съемки.

В настоящее время топографические карты, планы масштабов 1:500 – 1:25000 создаются в основном методами аэрофототопографической съемки. Карты мелких масштабов составляют по имеющимся картам крупных масштабов камеральным методом.

Аэрофотосъемка выполняется при помощи аэрофотоаппаратов АФА, устанавливаемых на борту самолета. На основе фотоснимков местности и предварительно созданного съемочного обоснования получают карты и планы. Обработка снимков ведется методами фотограмметрии – науки, занимающейся определением форм и размеров объекта по его фотографическому изображению. Съемочное обоснование представляет собой сеть из точек местности, изобразившихся на снимках, координаты которых известны (или определены).

Сплошная аэрофотосъемка обычно применяется для составления карт на большие территории. При изысканиях трасс трубопроводов производят аэрофотосъемку полосы местности вдоль выбранного направления. После обработки полученных снимков на фотограмметрических приборах получают топографический план полосы местности, который используется для уточнения положения трассы трубопровода.

К самолетам для аэрофотосъемки предъявляются определенные требования: они должны быть оборудованы фотолюками; иметь специальное навигационное оборудование; обеспечивать требуемую высоту фотографирования и скорость полета; возможность взлетать и приземляться на грунтовые взлетно – посадочные полосы (а не только бетонные); иметь невысокую эксплуатационную стоимость.

Фотосъемочная аппаратура. На борту самолета устанавливается три аэрофотоаппарата (АФА). Два аэрофотоаппарата обеспечивают непрерывность съемки. В момент перезарядки первого работает второй аппарат. Третий фотоаппарат резервный – включается в случае отказа первого или второго аэрофотоаппарата.

В комплект аэрофотоаппарата (АФА) обычно входят: сам АФА, съемные кассеты с пленкой, набор объективов с разными фокусными расстояниями, командный прибор. Сам АФА устанавливается на гиросtabilизирующей установке. Кроме того на борту самолета имеется статоскоп и радиовысотомер с фоторегистратором.

Схема АФА. (рис. 70)

1 – объектив АФА с центром проектирования S и фокусным расстоянием f_k ; 2 – Корпус АФА; 3 – Кассета с пленкой (кадр 18 x 18 см).

чаще всего применяются АФА с фокусным расстоянием $f_k = 70$ мм.

Кроме АФА при аэрофотосъемке применяют следующие приборы:

Статоскоп – барометр дифференциальный для определения превышения между снимками (впервые барометр дифференциальный был разработан Д. И. Менделеевым). Точность определения превышений соседних снимков – 1,9 – 1,4 м

Радиовысотомер – прибор (импульсный дальномер) для определения вертикального расстояния от самолета до земли в момент съемки. Точность 1 – 2 м.

На снимке в момент фотографирования изображаются координатные метки (рис. 72 б), по которым можно определить положение главной точки снимка о.

В момент фотографирования оптическая ось АФА должна быть вертикальна. Для удержания АФА в требуемом положении применяется гиростабилизирующая установка, удерживающая ось АФА в отвесном положении с ошибкой порядка 30'. Снимки, полученные при отвесном положении оптической оси АФА, называют плановыми или горизонтальными. Практически эти снимки получают с небольшими (до 3°) углами наклона. Снимки, полученные при углах наклона более 3° называют перспективными. Работой АФА управляет командный прибор, который подготавливает кадр, экспонирует и задает интервал фотографирования снимков. Различают аэрофотосъемку маршрутами (для целей изыскания трасс линейных сооружений) и аэрофотосъемку площадей.

При фотографировании местности по маршруту получают снимки через определенные интервалы, рассчитанные таким образом, чтобы соседние снимки маршрута (рис.71) перекрывались между собой.

Для фотографирования участка местности, значительного по площади, прокладывают ряд параллельных между собой маршрутов с соблюдением взаимного перекрытия между ними.

Для стереоскопического наблюдения снимков необходимо чтобы снимки в маршруте (рис. 71 б) перекрывались не менее, чем на 60%. Такое перекрытие называется продольным и обозначается P_x . Перекрытие снимков двух соседних маршрутов называется поперечным P_y и необходимо для связи маршрутов. Его величина 30 – 40%.

Аэрофотоснимок, его свойства и масштаб.

Аэрофотоснимок является центральной проекцией участка местности и по своим геометрическим свойствам отличается от топографического плана, который представляет собой ортогональную проекцию местности.

Если аэрофотоснимок горизонтален, а снимаемая местность плоская, то аэрофотоснимок представляет план, его масштаб будет (рис. 72 а)

$$\frac{1}{m} = \frac{av}{AB} = \frac{f_k}{H},$$

где H – высота фотографирования.

Под влиянием наклона оптической оси камеры и рельефа изображения точек местности на аэроснимке не будут соответствовать их плановому положению.

Снимки, полученные при небольших углах наклона (до 3'), называют плановыми, а при углах наклона более 3° - перспективными.

Ошибка в положении точки за наклон снимка.

На плановом снимке возможны два вида искажений: за наклон снимка и за рельеф местности. Эти ошибки, действуя суммарно, искажают масштаб фотографического изображения, в отличие от масштаба горизонтального снимка горизонтальной местности.

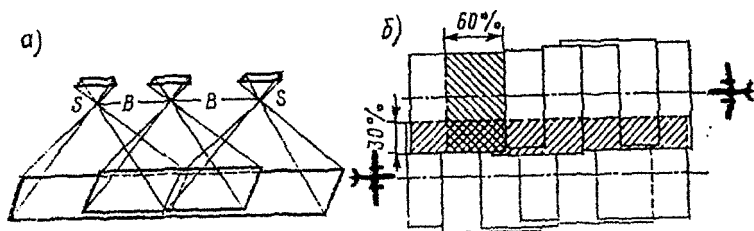


Рис. 71. Аэрофотоустановка:

а — маршрутная; б — площадная; S — центр проекция; B — базис

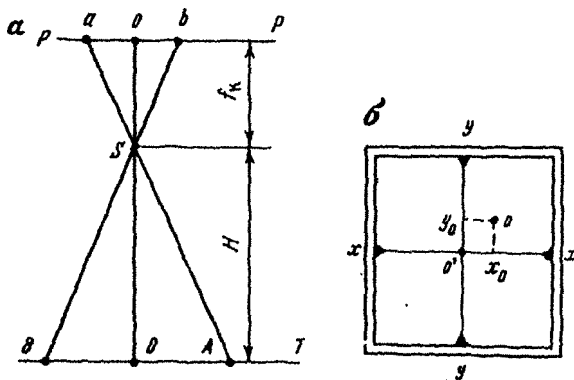


Рис. 72. К работе с аэрофотоустановкой:

а — схема определения масштаба горизонтального снимка; б — схема нанесения главной точки снимка

Рассмотрим особые точки и линии планового снимка (рис. 73).

Здесь S – центр проекции (оптический центр объектива); o – главная точка снимка;

$S_o = f$ – фокусное расстояние камеры; nN – отвесная линия; n – точка надира снимка;

$NS = H$ – высота фотографирования;

α – угол отклонения оптической оси АФА от отвесной линии; VV – главная вертикаль снимка (след пересечения вертикальной плоскости, проведенной через прямые nN и oO , с плоскостью снимка); cC – биссектриса угла α ; c – точка нулевых искажений;

$h_n h_n$, $h_c h_c$, $h_o h_o$ – горизонталы, проведенные через особые точки n , c и o перпендикулярно главной вертикали снимка.

Масштаб изображения на горизонтали $h_n h_n$ будет

$$\frac{1}{m_n} = \frac{an}{AN} = \frac{nS}{NS} = \frac{nS}{H}.$$

Из треугольника Sn_o имеем $nS = \frac{f_r}{\cos \alpha}$.

Тогда $\frac{1}{m_n} = \frac{f_r}{H \cos \alpha}$. Масштаб изображения на горизонтали $h_n h_n$ крупнее масштаба

горизонтального снимка, полученного с той же высоты H .

Масштабы по горизонталям $h_c h_c$ и $h_o h_o$ получаются следующие

$$\frac{1}{m_c} = \frac{f_1}{H}; \quad \frac{1}{m_o} = \frac{f_1 \cdot \cos \alpha}{H}.$$

Масштаб горизонтали, проходящей через точку O , мельче масштаба горизонтального снимка, и лишь на горизонтали $h_c h_c$, проходящей через точку нулевых искажений, масштаб равен масштабу горизонтального снимка.

Горизонталь $h_c h_c$ называют линией неискаженного масштаба.

Ошибку в положении точки за наклон снимка δ_{rx} можно определить по формуле:

$$\delta_{rx} = -\frac{r^2 \sin \alpha \cos \varphi}{f_1},$$

где α – угол наклона снимка;

f_1 – фокусное расстояние камеры;

r и φ – полярные координаты точки снимка.

За полюс снимка принята точка c (рис. 74), за полярную ось – главная вертикаль снимка, причем ее положительное направление – в сторону точки o . Счет четвертей координатной системы идет против часовой стрелки.

Из формулы следует, что ошибки в длине радиуса – вектора имеют знак «минус» в 1 и 4 четвертях, знак «плюс» – во 2 и 3 четвертях. То есть подтверждается уменьшение масштаба в той части снимка, где лежит точка o и увеличение масштаба в той части снимка, где лежит точка n .

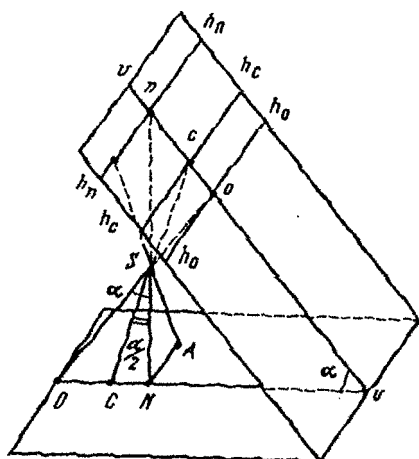


Рис. 73. К определению масштаба на наклонном склоне.

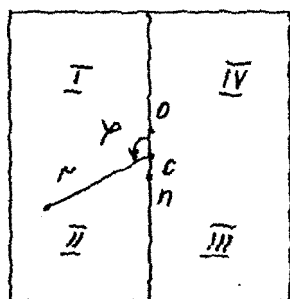


Рис. 74

Сдвиги точек, обусловленные наклоном снимка, направлены строго по радиусу – вектору к точке c или от точки c , поэтому углы при этой точке не искажаются, а точку c называют точкой нулевых искажений.

По направлениям к точке надира или от нее смещаются точки вследствие влияния рельефа. Углы при точке n не искажаются за рельеф. Поскольку точки c и n близки к точке o ($no = f \cdot \text{tg} \alpha$) на плановом снимке, то при графических построениях на снимке за вершину неискаженных углов принимают точку o .

Ошибка в положении точки за рельеф.

Точка A местности имеет превышение h относительно средней плоскости T_oT_o (рис. 75). Ее изображение на горизонтальном снимке PP будет в точке a . Для получения плана местности необходимо, чтобы изображение точки A было бы в точке a_o . Величина смещения $\delta_{rh} = aa_o$ носит название «ошибки за рельеф». Смещение точки a_o происходит по прямой, соединяющей данную точку с точкой надира n . Для горизонтального снимка точка надира n и главная точка o совпадают.

Если точка A лежит выше средней плоскости T_oT_o , то ее изображение смещено от главной точки, а если ниже, то к главной точке.

Величину смещения за рельеф можно определить из рис.

$$\frac{\delta_{rh}}{r} = \frac{A'A_o}{A'O} = \frac{h}{H}; \quad \delta_{rh} = \frac{h \cdot r}{H}.$$

где r – расстояние данной точки от главной точки, мм;

h – превышение данной точки над средней плоскостью, м;

H – высота фотографирования над средней плоскостью, м.

Знак ошибки определяется знаком превышений h . Смещение точек за рельеф происходит по направлению линий, соединяющих эти точки с точкой надира.

Понятие об определении превышений по стереопаре.

Положительное направление оси X в направлении полета, ось Y перпендикулярна.

Два соседних снимка образуют стереопару. Система координат снимков стереопары (рис. 76).

Продольным параллаксом точки, изображившейся на снимках стереопары, называют алгебраическую разность абсцисс этой точки, измеренных на левом и правом снимках стереопары:

$$P_a = X_a - X'_a$$

Другое определение продольного параллакса.

На рис. 77 снимки горизонтальны и лежат в одной плоскости. Базис фотографирования B – расстояние между центрами проекций двух соседних снимков – горизонтальный (высота фотографирования для обоих снимков одинаковая).

Проведем $S_2A' \parallel S_1A$, тогда $a'a'' = P_a$

$P_a = X_a - X'_a$; и с учетом знака $-X''_a$

$P_a = X_a - (-X''_a) = a'a''$

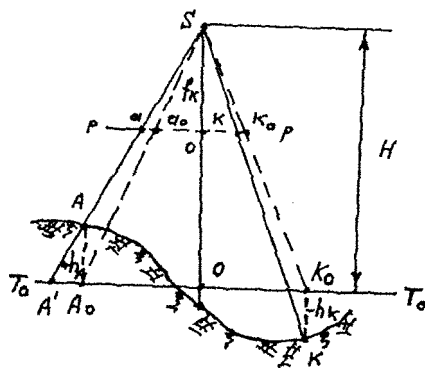


Рис.75

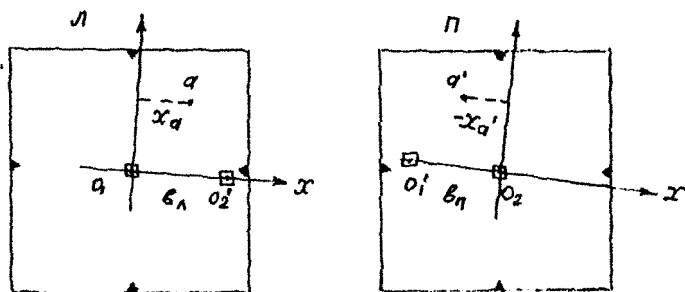


Рис.76

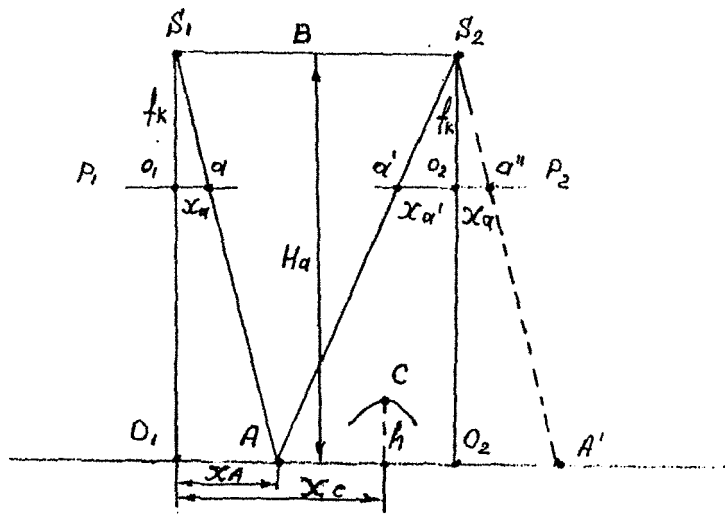


Рис. 77

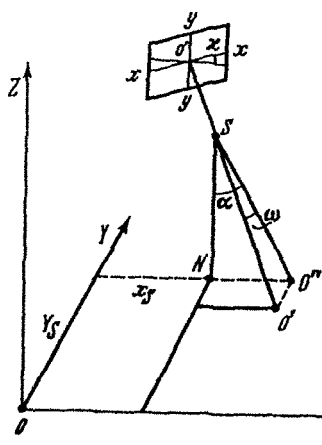


Рис. 78 Элементы внешнего ориентирования аэрофотоснимка

$\Delta S_2 a'a''$ подобен $\Delta S_2 AA'$.

$$\text{Отсюда } \frac{P_a}{B} = \frac{f_k}{H_A}$$

$$P_a = \frac{B \cdot f_k}{H_A} = \frac{B}{m_a}$$

Продольный параллакс точки есть базис фотографирования в масштабе изображения данной точки.

Точка C выше точки A на величину h . Масштаб изображения этой точки будет крупнее, по сравнению с масштабом изображения точки A , а продольный параллакс p_c больше p_a – продольного параллакса точки A .

$$\Delta p = p_c - p_a = \frac{B \cdot f_k}{H_a - h} - \frac{B \cdot f_k}{H_a} = \frac{B \cdot f_k \cdot (H_a - H_a + h)}{H_a \cdot (H_a - h)}$$

$$\text{Или } \Delta p = p_a \cdot h / H_a - h,$$

Решая это уравнения относительно h получим $\Delta p H_a - \Delta p h = p_a h$.

$$h = \frac{\Delta p \cdot H_a}{p_a + \Delta p}$$

Измерения Δp и p ведут до десятых, а в некоторых случаях до сотых и тысячных долей миллиметра.

(H определяют по показаниям радиовысотомера и статоскопа.)

обычно превышения определяют относительно главной точки правого снимка. В этом случае:

$$p_a = p_{O_2} = X''_{O_2} - X'_{O_2} = e_a; (X''_{O_2} = 0),$$

где e_a – базис, измеренный на левом снимке (расстояние между главной точкой O_1 левого снимка и перенесенной на него главной точки правого снимка O_2).

Аналогично, продольный параллакс главной точки левого снимка будет равен e_a – базису, измеренному на правом снимке. Можно записать

$$h = \frac{\Delta p \cdot H_{cp}}{e_{cp} + \Delta p}, \text{ где } e_{cp} = \frac{e_a + e_a}{2}, \quad H_{cp} = \frac{H_l + H_p}{2}.$$

Для равнинной местности с небольшими превышениями

$$h = \frac{\Delta p \cdot H_{cp}}{e_{cp}}.$$

В приведенной формуле не учитываются наклоны снимков, развороты снимков и наклон базиса фотографирования. С учетом этих факторов формула получается намного сложнее.

Планово – высотная подготовка изрофотоснимков.

Для обработки снимков необходимо, чтобы на каждом снимке было хотя бы 5 точек с

известными координатами (Z, X, Y). Координаты этих точек определяются наземными методами и в результате обработки снимков на стереоприборах. Обычно наземные определения (поскольку они трудоемки) выполняются не для всех точек, а через определенное число снимков маршрута (остальные точки определяют после наблюдения на стереоприборах).

§ 51. Внешнее и внутреннее ориентирование снимка.

Для фотограмметрических работ необходимо знать положение главной точки снимка, то есть положение основания перпендикуляра, восстановленного из оптического центра объектива на плоскость аэрофотоснимка. С этой целью прикладная рамка аэрофотоаппарата имеет четыре координатные метки, изображение которых получается при фотографировании на снимке (см. рис. 72б). Главная точка o снимка должна находиться на пересечении прямых, соединяющих противоположные метки снимка, то есть в точке o' . Но по техническим причинам точного совпадения этих точек обычно не бывает, поэтому главная точка снимка определяется координатами x_0, y_0 . Координаты x_0, y_0 главной точки o снимка и значение фокусного расстояния f_k фотокамеры являются элементами внутреннего ориентирования снимка.

Они определяются в результате калибровки съёмочной камеры и позволяют воспроизводить связку проектирующих лучей, существовавшую в момент фотографирования местности, относительно центра проектирования (задней узловой точки объектива).

Элементы внешнего ориентирования определяют пространственное положение связки проектирующих лучей аэрофотоснимка местности в момент фотографирования в заданной системе координат рис. 78. Положение аэроснимка в пространстве определяется шестью элементами внешнего ориентирования, из которых три являются линейными, а три угловыми, а именно: координаты центра проектирования x_1, y_1, z_1 ; продольный угол наклона аэроснимка α в направлении оси x , то есть угол между отвесной линией zn и проекцией so' главного луча на вертикальную плоскость, параллельную плоскости oxz ; поперечный угол наклона ω аэрофотоснимка между линией so' и проекцией $eo so'$ на вертикальную плоскость, параллельную плоскости oxz ; угол поворота χ аэрофотоснимка в своей плоскости между координатной осью снимка xx и линией пересечения снимка с плоскостью sno'' . Определение элементов внешнего ориентирования производится путём различных фотограмметрических построений.

Таким образом, положение снимка в пространстве определяется тремя элементами внутреннего ориентирования, относительно центра проектирования, и шестью элементами внешнего ориентирования относительно геодезической системы координат местности.

§ 52. Стереоскопическая модель местности.

Два соседних снимка маршрута образуют стереопару. В зоне перекрытия этих снимков с помощью специальных приборов можно наблюдать объемное изображение — стереоскопическую модель местности.

В § 51 показано как можно использовать стереомодель для определения превышений точек местности.

В принципе по стереопаре можно определить все три координаты точки местности X, Y, H . На рис. 77 треугольник $S_1 O_1 A$ подобен треугольнику $S_1 o_1 a$. Поэтому можно записать

$$X_a = x_a \frac{H_c}{f_k},$$

а для точки c

$$X_c = x_c \frac{H_c}{f_k}.$$

Аналогично можно получить

$$Y_a = y_a \frac{H_a}{f_k} \quad \text{и} \quad Y_c = y_c \frac{H_c}{f_k}.$$

Из треугольников $S_2 a' a''$ и $S_2 A A_1$ получим

$$H_a = B \frac{f_k}{p_a} \quad \text{и} \quad H_c = B \frac{f_k}{p_c}.$$

Приведенные формулы справедливы для идеального случая съемки. В действительности каждый из снимков стереопары имеет свои углы наклона и разворота. Имеются также наклоны базиса фотографирования. Все это приводит к искажению абсцисс и продольных параллаксов. Возникает также поперечный параллакс – разность ординат одноименных точек

$$q_a = y_a - y_a',$$

где y_a – ордината точки a , измеренная на левом снимке

y_a' – ордината точки a , измеренная на правом снимке стереопары.

Взаимное пространственное положение двух переврывающихся снимков определяется элементами внешнего ориентирования. Существует несколько систем взаимного ориентирования. Рассмотрим одну из этих систем, называемую базисной.

На рис. 79 показана взаимно ориентированная пара аэрофотоснимков, левая главная базисная плоскость и элементы взаимного ориентирования $\alpha_n, \alpha_n, \omega_n, \chi_n, \chi_n$.

Угол α_n , лежащий в плоскости W_n , образован главным лучом $S_n O_n$ и перпендикуляром к базису фотографирования $S_n S_n$. Он определяет продольный угол наклона левого снимка относительно базиса фотографирования. Аналогично угол α_n , также расположенный в плоскости W_n , образован проекцией $S_n O_n$ и определяет продольный угол наклона правого снимка относительно базиса $S_n S_n$.

Угол ω_n образован главным лучом $S_n O_n$ правого снимка и его проекцией на плоскость W_n . Этот угол называют взаимным поперечным углом наклона правого снимка. Поперечный угол

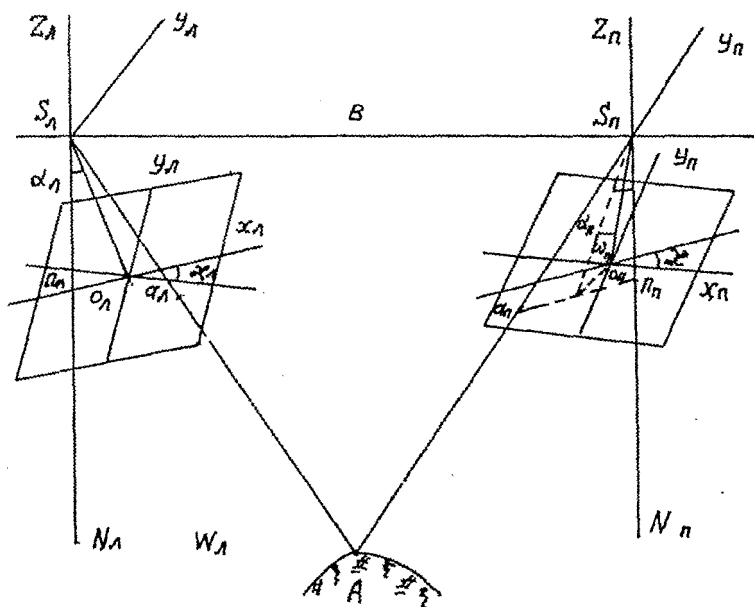


Рис.79

наклона левого снимка ω_x принимается равным нулю. Угол χ_x - угол между осью x_x левого снимка и следом сечения левого снимка главной базисной плоскостью W_x . Угол χ_x - то же, на правом снимке.

Системы взаимного ориентирования находят широкое применение при составлении топографических планов с помощью аналоговых стереофотограмметрических приборов и при определении координат точек аналитическими способами. Если элементы взаимного ориентирования известны, то можно получить модель местности, используя пару перекрывающихся снимков.

Допустим, что используемый стереофотограмметрический прибор имеет две проектирующие камеры. В камерах установим стереопару снимков, а на шкалах камер - элементы взаимного ориентирования. В результате обратного проектирования будет получена геометрическая модель сфотографированного объекта. Масштаб полученной модели зависит от базиса проектирования - расстояния между центрами проекции S_1 и S_2 проектирующих камер прибора. Чем расстояние больше, тем масштаб геометрической модели крупнее, и наоборот.

Элементы взаимного ориентирования могут быть найдены фотограмметрическими методами. Численные значения элементов взаимного ориентирования считывают со шкал стереофотограмметрического прибора после ориентирования пары снимков или определяют аналитически. В обоих случаях основой для их определения является следующее утверждение: пара смежных снимков будет взаимно ориентирована, когда любая пара одноименных проектирующих лучей находится в соответствующей базисной плоскости.

Полученная в результате взаимного ориентирования снимков геометрическая модель расположена в пространстве произвольно и имеет произвольный масштаб. Задачей *внешнего ориентирования модели* является приведение модели к заданному масштабу и ее пространственное ориентирование относительно заданной системы координат местности. Элементами внешнего ориентирования модели (рис. 80) служат: X_r, Y_r, Z_r - геодезические координаты начальной точки модели. Предполагается при этом, что известны фотограмметрические координаты этой точки X_ϕ, Y_ϕ, Z_ϕ ; α_m - угол поворота модели вокруг оси Y_ϕ ; ω_m - угол поворота модели вокруг оси X_ϕ ; χ_m - угол поворота модели вокруг оси Z_ϕ после поворотов модели на углы α_m и ω_m ; l - масштабный коэффициент.

Предположим, что имеем геометрическую модель K , полученную в результате взаимного ориентирования снимков на стереофотограмметрическом приборе. Фотограмметрическая система координат прибора - $S_1, X_\phi, Y_\phi, Z_\phi$ - не параллельна геодезической системе O_r, X_r, Y_r, Z_r . Если известны геодезические и фотограмметрические координаты начальной точки A модели, т.е. X_{rA}, Y_{rA}, Z_{rA} и $X_{\phi A}, Y_{\phi A}, Z_{\phi A}$, то можно определить их разность, а следовательно, начало фотограмметрической системы координат привести к геодезической системе координат. Поворот модели K вместе с плоскостью $Y_\phi X_\phi$ вокруг оси Y_ϕ на угол α_m позволит расположить ось X_ϕ параллельно плоскости $Y_r X_r$. Поворот на угол ω_m позволит плоскость $Y_\phi X_\phi$ установить параллельно плоскости $Y_r X_r$. В результате поворотов на углы α_m и ω_m ось Z_ϕ займет положение, параллельное оси Z_r . Повернув модель на угол χ_m вокруг оси Z_r , осуществим азимутальное ориентирование модели. Элемент l внешнего ориентирования используется для

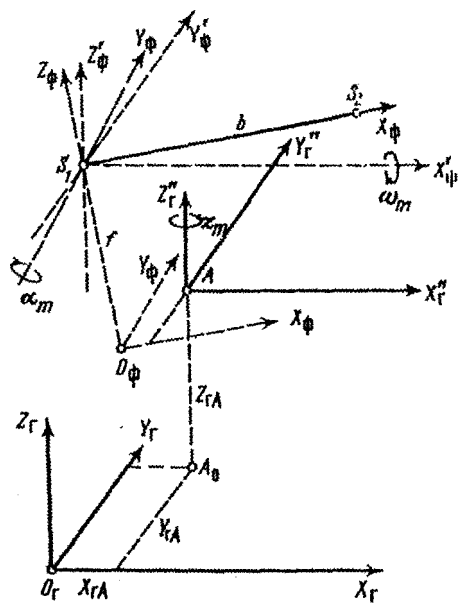


Рис. 80

приведения сориентированной модели к заданному масштабу.

Элементы внешнего ориентирования обычно находят путем использования соответственно расположенных опорных точек, геодезические и фотограмметрические координаты которых известны. Для определения элементов внешнего ориентирования надо иметь на модели не менее трех опорных точек: две точки с координатами XYZ и одну - только с Z. Завершив построение модели и ее ориентирование, можно получить плановое положение и высоту любой точки этой модели местности. Можно также проводить горизонтали с заданной высотой и выполнить съёмку ситуации, т.е. составить топографический план или карту в заданном масштабе.

§ 53. Топографическое дешифрирование аэро – и космических снимков.

При топографическом дешифрировании выделяют те элементы местности, которые необходимы при создании топографической карты. При специальном дешифрировании отбирают информацию геологического, геоморфологического, сельскохозяйственного и другого содержания с целью создания геологических, геоморфологических, почвенных и других специальных карт.

На современном уровне развития различают следующие методы дешифрирования: визуальный, машинно – визуальный, автоматизированный (диалоговый) и автоматический (машинный).

Визуальное дешифрирование, в котором информация со снимков считывается и анализируется человеком, представляет собой сложный многоступенчатый процесс логического анализа. В визуальном методе дешифрирования выделяют три основных способа: полевой, камеральный и комбинированный.

Полевое дешифрирование производят непосредственно на местности путем сопоставления снимка с натурой. Способ полевого дешифрирования является наиболее надежным, но требует больших затрат времени и средств. На труднодоступной территории непосредственное посещение местности часто заменяется обзором ее с летательного аппарата. Этот способ дешифрирования называется *аэровизуальным*.

Камеральное дешифрирование заключается в логическом анализе изображений с использованием всего комплекса дешифровочных признаков и применением стационарных приборов. Достоверность камерального дешифрирования повышается при использовании снимков-эталонов типичных участков, дешифрированных в поле. Дешифровочные признаки при этом уточняются применительно к определенным снимкам и к конкретным условиям.

Комбинированный способ дешифрирования сочетает в себе особенности и приемы полевого и камерального способов. В зависимости от последовательности их чередования могут быть определены варианты, в которых, например предварительно выполняется камеральное дешифрирование, а затем полевая доработка сложных участков с сопутным контролем выполненных камерально результатов, либо наоборот. Могут быть и иные технологические варианты.

В *машинно-визуальном дешифрировании* видеoinформация предварительно преобразуется специализированными или универсальными интерпретационными машинами для облегчения последующего визуального анализа изображения. Наиболее часто это осуществляется путем синтеза цветных изображений многозональной видеoinформации.

Автоматизированное дешифрирование выполняется интерпретационной системой, которой производится считывание со снимков и анализ видеoinформации при активном участии человека. По принципу обработки видеoinформации различают цифровые, аналоговые и гибридные системы. С помощью цифровых средств обрабатывают видеoinформацию, представленную в цифровой форме. Аналоговые средства обрабатывают фотографические изображения и их развертку в аналоговой записи, а также сканерную видеoinформацию, представленную в аналоговой форме. В гибридных средствах сочетаются достоинства цифровых и аналоговых средств.

Автоматическое (машинное) дешифрирование выполняется полностью интерпретационными машинами.

Дешифрирование для составления топографических карт выполняется в настоящее время преимущественно визуальным методом, так как значительный объем информации, подлежащей нанесению на такие карты, не поддается машинному определению по снимкам. Из приемов машинно-визуального метода могут быть использованы только способы предварительной обработки изображений с целью улучшения их дешифрируемости. Автоматизированное дешифрирование применяется в основном для составления средне- и мелкомасштабных специальных карт для решения информационно-оперативных задач.

Опознавание и раскрытие содержания отдельных объектов, изображенных на фотоснимках, связано с использованием основных признаков дешифрирования. При визуальном дешифрировании отдельных объектов используют прямые и косвенные признаки. *Прямые признаки* присущи самим объектам и их фотонизображениям. К ним относятся форма, размер, детали, структура, тон, цвет и тень. Прямые признаки без привлечения других данных с той или иной степенью достоверности обеспечивают непосредственное распознавание объектов. Чем больше вскрыто прямых признаков, тем достовернее результат дешифрирования.

Косвенные признаки непосредственно к объекту не относятся. Сами по себе они обеспечивают распознавание объектов, но указывают на наличие объекта, не определяемого по прямым признакам или не изобразившегося на снимке, способствуют устранению неоднозначности решений, принятых по результатам анализа прямых признаков, позволяют получить дополнительные характеристики объектов. К косвенным признакам относятся размещение объектов, их взаимосвязь, результаты деятельности человека, следы работы различных машин. Обнаружить на снимке косвенные признаки объектов сложнее, чем прямые.

Дешифровочные признаки

Дешифровочные признаки делят на постоянные и временные. Постоянными признаками являются форма, размер, структура, местоположение и взаимосвязь объектов; временными - детали, тон и цвет, тень, следы деятельности объектов. Временных признаков может и не быть.

Форма объекта - главный прямой признак искусственных объектов, так как для них, как правило, характерны геометрически правильные очертания. Любые здания и сооружения имеют правильные конфигурации. То же можно сказать о каналах, шоссе и железных дорогах, парках и скверах, пахотных и культурных угодьях и других искусственных объектах. Элементы формы присущи и естественным образованиям: руслам рек и озер, границам леса и т.п. Однако эти формы, как правило, неопределенны, далеки от форм правильных фигур и поэтому менее ценны при распознавании.

Форма объектов используется так же как косвенный признак для определения характеристик других объектов. Например по форме русла реки судят об особенностях геологического строения местности, по форме острова и наносов - о направлении течения реки, по изменению прямолинейности и разветвлению грунтовой дороги - о характере грунта и т.п.

Размер - менее определенный, чем форма, дешифровочный признак. Зная размер объекта, можно, например, различить изображения дорог разных классов, характер построек в населенном пункте. Об относительной высоте объектов судят по их изображению на краях снимков, полученных с помощью широкоугольных съемочных систем. О размерах и о форме можно судить по падающим от объектов теням. Часто по размерам косвенным путем получают характеристику объекта, например, назначение постройки, грузоподъемность моста, отличие лесного массива от группы деревьев, леса от поросли и др.

Детали объектов, их характер и количество дают представление о сложности объекта, позволяют его отличить от ему подобных. Так, данные о характере насыпей, выемок, мостов и переездов помогают классифицировать дороги, а количество и состав производственных и вспомогательных корпусов, складов сырья и готовой продукции и т.п. позволяют определить типы промышленных предприятий. Некоторые детали объекта могут быть самостоятельными объектами со своими деталями. Это, например, элементы населенных пунктов: микрорайоны, кварталы, парки и т.п.

Структура поверхности объекта и его изображение являются совокупностью нескольких признаков - формы, размеров, тона и др. Так, внешний вид поверхности леса образуют кроны деревьев. На снимке изображение леса выглядит в виде зернистой структуры. Характер этой структуры обусловлен главным образом формой кроны, ее размерами и сомкнутостью.

Структура изображения объекта - важный признак многих естественных элементов местности, не имеющих характерной формы. Этот признак очень устойчив, на него в меньшей степени влияют свойства полученных аэрофотоснимков. Например, масштабные преобразования почти не меняют характер зернистой структуры. Так, размер зерен структуры изображения леса продолжает превосходить размер зерен других структур, например, кустарника.

Тон изображения зависит от яркости объекта в пределах спектральной чувствительности приемника излучения съемочной системы. Этот признак непостоянен. Изображение одного и того же объекта может иметь различный тон в зависимости от освещения, погоды, сезона и т.д. Так, дороги, сфотографированные летом, изображаются светлыми лентами, а зимой - темными. Тон изображения может меняться из-за других причин; времени фотографирования,

состояния атмосферы, фотоматериалов, условий их обработки и т.п. Большое значение при дешифрировании имеют соотношения тонов (тоновые контрасты), которые обладают сравнительной устойчивостью.

Цвет изображения - важный дешифровочный признак. На цветных снимках элементы местности и объекты, расположенные на ней, изображаются цветами, близкими к естественным. На спектрональных снимках элементы местности и другие объекты изображаются условными цветами. Изображения одних и тех же объектов на разных снимках могут иметь существенные различия в цвете, так как он зависит от условий аэрофотосъемки, свойств фотоматериалов и их обработки.

На спектрональном снимке большое значение имеют соотношения цветов, особенно при дешифрировании растительности, мелкой гидрографической сети и т.п.

Тени объектов и их изображения на снимке играют значительную роль при распознавании объемных объектов малого размера и контраста. По тени можно судить о форме и высоте объекта. Некоторые из них (опоры линий электропередач, мачты антенн и др.) часто распознаются только по тени. Различают тени собственные и падающие. *Собственной тенью* называется неосвещенная часть поверхности объекта, расположенная со стороны, противоположной Солнцу. На одиночных снимках собственные тени создают зрительную видимость объемности объекта. *Падающей* называется тень, отбрасываемая объектом на земную поверхность. Для дешифрирования падающие тени имеют особое значение. Они повторяют форму объекта в зависимости от положения Солнца и его высоты. Форма тени позволяет мысленно восстановить форму объекта, а по размеру тени можно определить его высоту.

Косвенные признаки подразделяют на природные, антропогенные и природно-антропогенные. К *природным признакам* относят взаимосвязи и взаимообусловленности объектов и явлений в природе. Их также называют *ландшафтными*. Такими признаками могут быть, например, связь рельефа с геологическим строением местности и их совместная роль в почвообразовании, в развитии типа растительности. Объекты, используемые при опознавании и определении характеристик недешифрирующихся непосредственно объектов, называют *индикаторами*, а дешифрирование — *индикационным*. Такое дешифрирование может быть многоэтапным, когда непосредственные индикаторы дешифрируемых объектов опознаются с помощью вспомогательных индикаторов. Приемами индикационного дешифрирования решаются задачи по обнаружению неотобразившихся на снимках объектов. Так, по растением-индикаторам выполняют поиск грунтовых вод, полезных ископаемых, или по развитию гидросети опознают морфоструктуры, во многих случаях соответствующие антиклинальным или синклинальным складкам.

По *антропогенным признакам* опознают объекты, созданные человеком. При этом используют функциональные связи между объектами, их положение в общем комплексе сооружений. Например, пункты опорной геодезической сети распознаются на снимках по выделенному для них наделу земли, виду пункта и его тени. В лесу к ним прорубают визирные просеки, сходящиеся в месте расположения пункта. Аналогично сельскохозяйственные

ремонтные мастерские опознаются по изображению расположенных на территории машин. Линии электропередач и связи выявляются по незапаханным около них участкам земли. В лесных массивах они проходят по прямолинейным просекам.

К *природно-антропогенным признакам* в связи с зависимостью деятельности человека от определенных природных условий относятся проявления свойств природных объектов в деятельности человека. Так, по размещению некоторых видов сельскохозяйственных культур можно составить суждение о свойствах почв, или по наличию и расположению нефтепромысловых объектов - о форме и размерах залежей нефти и т.п.

Основной задачей геологического дешифрирования аэрофотоснимков является составление на их основе высококачественной геологической карты в более короткие сроки, чем обычными полевыми методами. Это достигается установлением по аэрофотоснимкам границ распространения стратиграфических комплексов, представленных литологически разнородными толщами. Особенно отчетливо это выявляется на геологически открытых площадях с применением цветной спектральной аэрофотосъемки.

Структура фотозображения на аэроснимке в ряде случаев позволяет выявить такие геологические закономерности, которые при наземных исследованиях фиксируются с трудом. На аэроснимках наиболее легко дешифрируются разрывные нарушения. В простейшем случае представляется возможным установить разрыв пластов по их смещению по амплитуде, изображившейся в масштабе аэрофотоснимка. Наличие разрыва обнаруживается по нарушению непрерывности дешифрируемых пластов, которые выражаются резкой сменой пород с различным тоном, сменой форм рельефа; по срезанию слоистости, выклиниванию отдельных горизонтов и т.п. Четко выражаются на аэроснимках крупные трещины. Многие разрывы выражаются в рисунке гидрографической сети. Слоистость передается на аэроснимках чередованием тонов различной плотности, зависящей от окраски этих слоев. Горизонтально залегающие слои при расчлененном рельефе дают сложный рисунок выходов слоев, повторяющий формы рельефа. При наклонном залегании и слабо расчлененном рельефе слои вытягиваются вдоль их общего простирания. Нормальные антиклинальные складки дешифрируются по падению пластов на крыльях, направленных в противоположные стороны от осевой линии складки.

§ 54. Особенности космических снимков, их топографического и геологического дешифрирования.

В комплексе дистанционных методов изучения земной поверхности и верхней части земной коры изображения, полученные из космоса в настоящее время играют основную роль. По полноте и объему информации, содержащейся в одном кадре, с космическими снимками не может сравниться никакой другой вид дистанционной регистрации. Объясняется это рядом обстоятельств.

Космический снимок, по аналогии с аэрофотоснимком, является привычным видом информации для широкого круга специалистов. Так, при государственном геологическом картировании, использование аэрофотоснимков считается обязательным. Космический снимок, содержащий изображения различных элементов ландшафта, поставляет материал

для исследований картографам, топографам, геоморфологам, географам и т.д. По космическим фотоснимкам, выполненным метрическими системами, можно измерять все три координаты и тем самым определять различные ландшафтные элементы и проводить картирование, а также выполнять привязку к местности данных, полученных нефотографическими приемниками.

Космические снимки, благодаря своей обзорности, существенно дополняют аэроснимки. Изображения, полученные из космоса, не просто отличаются какими-то достоинствами или недостатками по сравнению с аэрофотоснимками, а обладают принципиально новыми качествами. Это связано прежде всего с повышенной обзорностью и генерализацией изображения. Один космический снимок покрывает на земной поверхности площадь несколько десятков тысяч квадратных километров. Появилась возможность по-иному интерпретировать результаты дешифрирования, когда в поле зрения попадают объекты больших размеров, сфотографированные при одних и тех же природных условиях одной системой. Фотографические съемки из космоса, по сравнению с аэрофотосъемкой, обеспечивают значительную генерализацию полученных данных, что устраняет мешающее при дешифрировании маскирующее влияние относительно небольших объектов и элементов ландшафта. Именно эти возможности позволяют раскрывать по космическим снимкам наиболее общие закономерности, которые при использовании других видов съемок выявить обычно нельзя. Наконец, сравнение разновременных космических изображений одной и той же территории местности позволяет выявить происходящие на земной поверхности изменения в связи с экзогенными и эндогенными процессами.

Полнота и объем информации, получаемые с космических снимков, зависят от их разрешающей способности, определяемой освещенностью ландшафтов, их яркостью, спектральными характеристиками, оптическими свойствами объектива, техническими характеристиками фотоплёнок, масштабом съемки. Современная аппаратура позволяет получать снимки с разрешением на местности 30 м, а сильно контрастных объектов - до 5-10 м и менее. Фотографирование с космическими летательных аппаратов производится камерами формата от 24 до 70 мм с фокусным расстоянием от 38 до 3000 мм с высоты от 200 до 400 км. Масштаб снимков имеет широкий диапазон.

В геометрическом отношении космические снимки существенно отличаются от аэрофотоснимков. Они имеют большие искажения за счет сферической поверхности Земли, изменения высоты полета, рефракции атмосферы. Вместе с тем искажения за рельеф на космических снимках практически отсутствуют. Несмотря на то, что принципы проведения космической съемки во многом схожи с аэрофотосъемкой, установка съемочной аппаратуры на космических кораблях способствует получению качественно и количественно новых данных. Так, за время использования космических снимков уже накоплен значительный опыт, который применяется при региональных и детальных исследованиях. Созданы основы методики дешифрирования и интерпретации космических снимков в комплексе с топографическими, геологическими, геофизическими, геоморфологическими, геохимическими, ландшафтными и другими материалами.

Внедрение космических методов съемки, в частности, позволило получить принципиально новые сведения о структурном плане осадочного чехла, использование которых повышает эффективность геолого-геофизических работ и геологопоискового бурения. Дистанционная информация способствует повышению эффективности исследований, ускорению научно-технического прогресса. Разработанные методики дешифрирования и интерпретации материалов дистанционного зондирования позволяют получать в разной мере дополняющие или уточняющие представления о рельефе, о структурном плане осадочного чехла и земной коры в целом, о направленности, интенсивности и степени дифференцированности новейших и современных движений. Специальные исследования нацелены на выявление локальных поисковых объектов, поиски стройматериалов, изучение вечной мерзлоты, геотермических аномалий, почв, выбор трасс трубопроводов и дорог, районов строительства, охрану окружающей среды и т.п.

Космогеологические методы дешифрирования позволили в частности ускорить составление обзорных и региональных геологических карт, дали принципиально новую информацию о развитии линейных структурных элементов (разломов, зон трещиноватости, флексур) и площадных объектов различной формы (многоугольных, округлых и др.), что в комплексе с геолого-геофизическими материалами способствует уточнению строения осадочного чехла, трассированию зон благоприятных поисковых структур.

Благодаря отмеченным свойствам космических снимков, на них особенно четко выступает ландшафтообразующая роль геологического строения местности. Поэтому изучение взаимосвязей геологических объектов с компонентами и элементами ландшафта приобретает при дешифрировании особое значение. Рельеф является основным индикатором геологического строения местности. При дешифрировании крупномасштабных аэрофотоснимков в качестве индикаторов используют отдельные микро- и мезоформы рельефа, а при работе с мелкомасштабными аэроснимками - и типы рельефа. Микроформы рельефа на космических снимках, как правило, не изображаются и поэтому не играют роли. Напротив, значительно возрастает роль типов рельефа, которые могут служить индикатором состава пород и крупных литолого-формационных комплексов. Характер границ отдельных типов рельефа указывает на взаимоотношение различных толщ (контакт нормальный стратиграфический, несогласный или тектонический).

При использовании признаков дешифрирования, основанных на относительных превышениях, следует учитывать следующее обстоятельство. Минимальное превышение Δh , которое улавливается глазом наблюдателя при стереоскопическом рассмотрении фотоснимков, зависит от высоты H полета, базиса b съемки и оптического увеличения v прибора:

$$\Delta h = \frac{250 \alpha H}{b v},$$

где α - острота стереоскопического зрения; 250 мм - расстояние наилучшего видения.

Приняв $\alpha = 30''$ (в радианной мере - 0,000 145), $b = 28$ мм, $H = 200$ км, $v = 1,3$ (зеркально-линзовый стереоскоп), получим $\Delta h = 200$ м, т.е. превышения до 200 м неразличимы. Если оптическое увеличение прибора составит $v \approx 9$ (при большем увеличении изображение обычно

расплывается), превышение составит около 30 м. Таким образом, определение высотного положения форм рельефа на космоснимках, полученных с высоты 200 км, возможно лишь при превышениях больше 30 м. Формы рельефа с меньшими относительными высотами можно опознать по косвенным признакам: характеру гидросети, растительности, фототону.

На космических снимках, имеющих разрешение на порядок ниже, чем аэрофотоснимок, изображаются элементы более высоких порядков. Вместе с тем изобразившиеся на космических снимках водотоки высоких порядков позволяют установить наиболее крупные, региональные ландшафтные и геологические объекты: разломы, складчатые структуры, основные литолого-формационные комплексы. Наиболее уверенно на космических снимках выделяются те элементы гидросети, которые имеют четкое выражение в рельефе. В этом случае некоторые водотоки могут быть выявлены даже тогда, когда из-за небольших размеров сами они не опознаются. Проявлению элементов гидросети способствует также такой фактор, как приуроченность к ним растительности, что обуславливает темный тон изображения.

В отличие от обычных геологических карт, изображающих срез геологических образований поверхности Земли, космические снимки отражают геологические объекты и явления различной глубинности.

На космических снимках масштаба 1:2500 000 и мельче хорошо различаются платформенные, складчатые, орогенные области, четко трассируются глубинные разломы и сдвиги, а также зоны поперечных разломов, пересекающих геосинклинальные складчатые системы. В ряде областей прослеживаются погребенные протерозойские, каледонские и герцинские складчатые зоны, активизированные в современную эпоху, проявляются древние сводовые поднятия.

На космических снимках масштаба 1:1000000 - 1:500000 дешифрируются трансрегиональные и региональные системы линейamentos, связанные с разломами различного генезиса, вали и зоны локальных складок, а на космических снимках масштаба 1:200 000 на стадии региональных работ можно выявлять локальные ландшафтные элементы, которые соответствуют как известным погребенным складкам, так и новейшим структурным осложнениям различного масштаба. Практически во всех изученных регионах по космическим и аэроснимкам удастся наметить еще столько же новых перспективных объектов, сколько установлено геолого-геофизическими методами. Вдоль трассированных по снимкам разломов могут также локализоваться зоны выклинивания терригенных коллекторов нефтегазоносных комплексов.

При топогеодезическом обеспечении геолого-геофизических работ, при планировании объемов и размещении сети сейсмопрофилей часто используют результативные схемы аэрокосмических исследований, на которых показано расположение разнородных элементов, дешифрированных на снимках и интерпретируемых как проявление разломной и пликвативной тектоники.

Для унификации различных линейных и площадных форм, дешифрируемых на космических снимках по тональности, структуре или цвету, используется следующая

терминология. Линейные элементы делятся на две группы: 1) прямолинейные (линементы), с подгруппами по размерам - глобальные, трансрегиональные, региональные, зональные, локальные; 2) криволинейные (округлые, кольцевые, концентрические, овальные, дуговые). Площадные элементы классифицируются по форме границ: многоугольные, округлые (кольцевые, овальные), неправильной формы.

В итоге региональных и детальных аэрокосмических работ установлено, что подтверждаемость фотоаномалий, как локальных нефте-поисковых объектов, составляет 90 %.

Космические и аэроснимки играют большую роль не только для поиска и обустройства новых месторождений, но и при реставрации старых нефтяных промыслов, инвентаризации промыслового хозяйства, а также являются эффективным средством уточнения положения старых линий коммуникаций, трубопроводов и т.п.

Таким образом, космические снимки и космические карты имеют многоцелевое применение, отражают объекты и явления различной глубинности и, в частности, получают все большее значение при прогнозировании перспективных провинций и зон нефтегазоаккумуляции, используются в нефтепромысловом деле.

Отмеченные выше геометрические особенности космических снимков обуславливают отличительные способы решения различного рода задач измерительного дешифрирования по космическим снимкам, которые обычно классифицируют на три группы.

К первой группе относят измерения, выполненные непосредственно по космическому снимку. При этом одной из существенных особенностей фотограмметрической обработки является необходимость учитывать влияние кривизны земной поверхности. В определенных границах это влияние может оказаться незначительным, тогда можно пользоваться известными методами аэрофотограмметрии, рассмотренными выше. Следовательно, первоочередной задачей является установление границ, в пределах которых земную поверхность можно считать плоскостью.

Вторая группа предусматривает перенос результатов дешифрирования на картооснову и проведение измерений обычными методами и приемами картографии. отождествление фотограмметрического изображения земной поверхности с картой возможно в определенных границах, так как космический снимок и карта в общем случае построены в разных проекциях. Однако иногда сам космический снимок рассматривается в качестве фотокарты определенной картографической проекции. Таким образом, основной задачей при сопоставлении космического снимка с картой является выяснение допустимых границ их отождествления.

Третья группа представляет собой комплекс задач, решаемых аналитическими способами. В этом случае по координатам изображения можно находить искомые величины, такие как площади отдешифрированных контуров, расстояния и т.п. Как правило, эту задачу измерительного дешифрирования можно решить с применением ЭВМ, что требует создания соответствующих программ. Основой подобных задач является прямая фотограмметрическая засечка, когда с помощью известных элементов внешнего ориентирования плоские координаты изображения пересчитываются в пространственные координаты местности.

§ 55. Понятие об инклинометрии.

Исходной информацией о пространственном положении скважины (её плана и профиля) являются измерения зенитных углов и азимутов, выполняемые в скважине через определённые интервалы специальными приборами — инклинометрами. Процесс получения этих данных называется инклинометрией.

Работы датчиков инклинометров основана на принципах использования магнитного и гравитационного полей Земли, а в некоторых типах инклинометров на использовании гироскопического эффекта — эффекта «волчка».

Для измерения зенитного угла скважины (углы отклонения скважины от вертикали) используется маятник (отвес), который под воздействием гравитационного поля Земли занимает внутри прибора отвесное положение.

Чувствительным элементом геомагнитного датчика является магнитная стрелка на специальной подвеске

Сила действия магнитного поля Земли на чувствительный элемент датчика (стрелку) по сравнению с его весом незначительна. Поэтому возникает необходимость предварительного ориентирования оси вращения магнитной стрелки в положение, примерно перпендикулярное к вектору магнитных силовых линий. Кроме этого, магнитное поле Земли в зоне действия датчика не должно быть экранировано или искажено в результате наложения другого магнитного поля. Магнитные инклинометры применяют в скважинах без обсадных труб.

В случаях невозможности применения магнитных инклинометров используют инклинометры с гироскопическими датчиками. Однако пока гироскопические инклинометры уступают по точности магнитным. Ниже приведены характеристики магнитных инклинометров КИТ и КИТА, а также гироскопических инклинометров ИГ-32 и ИГ-50.

Характеристики инклинометров.

Модель инклинометра	КИТ	КИТА	ИГ-32	ИГ-50
Основные характеристики				
Диапазон измерения угла наклона	0-50°	0-50°	0-60°	0-60°
Погрешность измерения угла наклона	±0,5°	±0,5°	±0,5°	±0,5°
Диапазон измерения магнитного азимута	0-360°	0-360°		
Погрешность измерения магнитного азимута при углах наклона более 3°	±3°	±3°		

Диапазон измерения истинного азимута			0-360°	0-360°
Погрешность измерения истинного азимута при углах наклона более 5°			±5°	±5°
Диаметр прибора	60мм	75мм	32мм	50мм
Длина прибора	1,8м	1,8м		
Максимальная температура	120°	120°	60°	60°
Максимальное давление	65МПа	120МПа		
Максимальная глубина			1000м	2000м

В общем случае задача определения пространственного положения скважины сводится к получению и обработке информации, характеризующей кривизну траектории скважины.

Инклинометры позволяют получить дискретно три параметра:

1. Глубину скважины в точке замера L
2. Угол отклонения скважины от вертикали (зенитный угол) θ
3. Магнитный азимут плоскости искривления скважины в точке замера Am .

Координаты точек траектории оси скважины можно получить в различных системах. Чаще всего для этих целей используют систему пространственных прямоугольных координат с началом координат в точке устья скважины. В этой системе координат, координаты точки K скважины могут быть получены из следующих выражений:

$$\begin{aligned}
 x_K &= x_0 + \sum_{i=0}^K l_i \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i \\
 y_K &= y_0 + \sum_{i=0}^K l_i \cdot \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i \\
 z_K &= z_0 - \sum_{i=0}^K l_i \cdot \cos \theta_i
 \end{aligned} \quad (48)$$

где x_0, y_0, z_0 - координаты устья скважины,

l_i - длина отрезка скважины между двумя смежными точками измерений углов θ и Am . Её обычно называют интервалом измерения;

θ_i - угол отклонения оси скважины от вертикали (зенитный угол) в точке замера. Геометрически угол θ можно представить как угол, лежащий в вертикальной плоскости между отвесной линией и касательной (хордой) к данной точке криволинейной оси скважины;

α_i - дирекционный угол плоскости искривления оси скважины в точке замера.

Переход от измеряемых в скважине магнитных азимутов к дирекционным углам выполняют путём введения в измеренные значения поправок в соответствии с формулой

$$\alpha = Am + \delta - \gamma$$

где δ - угол склонения магнитной стрелки; γ - угол сближения меридианов. Углы δ и γ подставляются в эту формулу со своими знаками. Их значения приведены на топографических картах.

Погрешности определения приращений координат.

Координаты точек, получаемые в соответствии с выражением (1) являются приближенными, что порождает неопределённость в определении пространственного положения скважины. Эта неопределённость обусловлена:

- погрешностями моделирования траектории оси скважины, или выбором аппроксимирующей функции по данным дискретных измерений
- погрешностями измерений угловых и линейных параметров в скважинах.

На отрезке между точками замеров параметров скважины её траектория может аппроксимироваться или с помощью касательной, или с помощью хорды.

В первом случае отрезок между смежными точками замеров на всём интервале l рассматривают как касательную к дуге окружности в точке замера, т.е. распространяют значение углов θ и α измеренных в этой точке на весь интервал.

Во втором варианте отрезок l считают хордой, при этом углы θ и α измеренные в конечных точках интервала осредняются. Этот вариант применяется чаще всего.

Погрешность координат, обусловленная ошибками измерений.

Для определения погрешности координат, обусловленных ошибками измерений, используем формулу погрешности функции общего вида $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_1, x_2, \dots, x_n - независимо измеренные величины со средними квадратическими ошибками m_1, m_2, \dots, m_n . Средняя квадратическая погрешность функции такого вида (§ 57) будет

$$m_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 \cdot m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 \cdot m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 \cdot m_n^2$$

Берём частные производные выражений (48) по переменным l, θ и α , получим

$$\begin{aligned}
m_{x_k}^2 &= \sum_{i=1}^K \sin^2 \theta_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot m_i^2 + \sum_{i=0}^K l_i^2 \cdot \cos^2 \theta_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot m_{\theta_i}^2 + \\
&+ \sum_{i=0}^K l_i^2 \cdot \sin^2 \theta_i \cdot \sin^2 \alpha_i \cdot m_{\alpha_i}^2 \\
m_{y_k}^2 &= \sum_{i=1}^K \sin^2 \theta_i \cdot \sin^2 \alpha_i \cdot m_i^2 + \sum_{i=0}^K l_i^2 \cdot \cos^2 \theta_i \cdot \sin^2 \alpha_i \cdot m_{\theta_i}^2 + \\
&+ \sum_{i=0}^K l_i^2 \cdot \sin^2 \theta_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot m_{\alpha_i}^2 \\
m_{z_k}^2 &= \sum_{i=0}^K l_i^2 \cdot \sin^2 \theta_i \cdot m_{\theta_i}^2 + \sum_{i=1}^K \cos^2 \theta_i \cdot m_i^2
\end{aligned} \tag{49}$$

где m_{θ_i} и m_{α_i} выражены в радианной мере $\left(m_{\theta} = \frac{m_{\theta}}{\rho}; m_{\alpha} = \frac{m_{\alpha}}{\rho} \right)$

Погрешность измерения длины l равная $\frac{m_l}{l} = \frac{1}{1000}$ значительно погрешностей измерения θ и α , поэтому членом формул содержащим можно пренебречь и тогда выражения (49) можно записать

$$\begin{aligned}
m_{x_k}^2 &= \sum_{i=1}^K l_i^2 \cdot \cos^2 \theta_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot m_{\theta_i}^2 + \sum_{i=1}^K l_i^2 \cdot \sin^2 \theta_i \cdot \sin^2 \alpha_i \cdot m_{\alpha_i}^2 \\
m_{y_k}^2 &= \sum_{i=1}^K l_i^2 \cdot \cos^2 \theta_i \cdot \sin^2 \alpha_i \cdot m_{\theta_i}^2 + \sum_{i=1}^K l_i^2 \cdot \sin^2 \theta_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot m_{\alpha_i}^2 \\
m_{z_k}^2 &= \sum_{i=1}^K l_i^2 \cdot \sin^2 \theta_i \cdot m_{\theta_i}^2
\end{aligned}$$

Пример: $l_1 = l_2 = K = l_i$, $k = 10$

(глубина скважины ~ 1000 м)

$$\theta = 30^\circ; \quad \alpha = 45^\circ; \quad m_\theta = 0,5^\circ; \quad m_\alpha = 3^\circ$$

$$\text{при } \alpha = 45^\circ; \quad m_x = m_y$$

$$m_{x_k}^2 = m_{y_k}^2 = 10 \cdot 100 \cdot 100 \cdot (0,75 \cdot 0,5 \cdot 0,000076) + \\ + 10 \cdot 100 \cdot 100 \cdot (0,25 \cdot 0,5 \cdot 0,00274) = 37,10$$

$$m_{x_k} = m_{y_k} = 6 \text{ м}$$

линейное смещение будет в $\sqrt{2}$ раз больше, т.е. 8,5 м.

$$m_{z_k}^2 = 10 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 0,25 \cdot \frac{1}{13133} = 1,9$$

$$m_{z_k} = 1,38 \text{ м}$$

Для повышения точности вычисления координат точек оси скважины применяют иногда формулы

$$x_k = x_0 + \sum_{i=0}^k l_i \cdot \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cdot \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}$$

$$y_k = y_0 + \sum_{i=0}^k l_i \cdot \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cdot \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}$$

$$z_k = z_0 - \sum_{i=0}^k l_i \cdot \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2}$$

в которых $\theta_{i-1}, \theta_i, \alpha_{i-1}, \alpha_i$ — зенитные и дирекционные углы измеренные в начале и конце интервала l_i .

Глава 7

Сведения из теории погрешностей измерений.

§ 56. Оценка точности результатов измерений.

Измерение — это процесс сравнения некоторой физической величины с однородной ей величиной, принятой за единицу измерения. Результат любого измерения q — это число (или коэффициент), показывающее, во сколько раз измеряемая величина Q больше или меньше единицы измерения τ :

$$Q = q \cdot \tau.$$

Измерения бывают прямые (непосредственные) и косвенные (посредственные). В *прямых измерениях* определяемая величина непосредственно сравнивается с единицей измерения. (Например, при измерении длины отрезка рулеткой).

В *косвенных измерениях* определяемую величину получают после измерений других

величин, связанных с определяемой величиной функционально. (Например, для вычисления превышения по формуле тригонометрического нивелирования, необходимо измерить угол наклона, расстояние, высоту прибора и высоту визирной цели).

При проведении измерений необходимо решать следующие вопросы: с какой точностью измерять и какими методами (и приборами), как оценить точность получаемых результатов и как избежать грубых просчетов.

Результат измерений неизбежно содержит погрешность. Если обозначить через l результат измерений, а через X точное значение измеряемой величины, то разность между ними Δ называется истинной погрешностью

$$\Delta = l - X.$$

Точное значение измеряемой величины обычно неизвестно, однако в некоторых случаях в качестве него можно принимать результаты измерений, полученные более точным прибором или методом.

Иногда значение измеряемой величины может быть найдено из математических вычислений, закономерностей. Например, если измеряют углы в многоугольнике, то заранее известно, что сумма этих углов будет $180^\circ (n - 2)$.

Различают *необходимые измерения* и *избыточные измерения*. Так, если одна и та же величина измерена n раз, то одно из этих измерений является необходимым, а остальные $(n - 1)$ - избыточными. Избыточные измерения нужны для контроля результатов измерений, а также для получения более надежного значения измеряемой величины. Помимо этого наличие достаточного количества избыточных измерений дает возможность оценить точность выполненных измерений.

Погрешность результата измерения возникает в результате действия множества факторов. Погрешности, возникающие от действия отдельных факторов, называются *элементарными*. Погрешность результата измерения складывается из элементарных погрешностей. По характеру воздействия на результаты измерений различают погрешности грубые, случайные и систематические.

Грубые погрешности или промахи возникают в результате невнимательности исполнителя; их выявляют при повторных измерениях и результаты, содержащие грубые погрешности, исключают из обработки. Так например, на станции технического нивелирования превышения определяют дважды по черной и красной шкалам реек. Расхождение превышений h_1 и h_2 допускается не более 5 мм. При невыполнении этого условия результаты бракуют, а превышение определяют заново при другом горизонте нивелира.

Систематические погрешности возникают, если не учтен постоянно действующий фактор; они влияют на результаты измерений с одним знаком или по определенному закону. Систематическую погрешность стремятся исключить из результатов измерений путем введения поправки или за счет соответствующей методики измерений. Однако полностью исключить систематическую погрешность не всегда удается. В качестве примера исключения систематической погрешности можно привести введение поправки в длину измеряемой линии за компарирование прибора.

Считается, что полностью исключить систематические погрешности невозможно, и они входят в результаты измерений, как элементарные случайные погрешности.

Случайные погрешности или неизбежные - это такие погрешности, величина которых и знак меняются случайным образом. В совокупности случайные погрешности подчиняются тому или иному вероятностному закону, называемому *законом распределения случайных погрешностей*. Чаще других при обработке геодезических измерений применяют закон нормального распределения (закон Гаусса).

Измерения выполняют при наличии следующих условий и факторов: объект измерения, наблюдатель, измерительный прибор, метод измерения, внешняя среда, момент измерения.

Измерения, выполненные в одинаковых условиях, называют *равноточными*. Вследствие изменений, происходящих с объектом измерений, наблюдателем, прибором и внешней средой с течением времени, условия измерений варьируются и результаты измерения нельзя в этих случаях считать равноточными. Однако принято считать, что в случае соблюдения требований и правил, изложенных в нормативных документах, при геодезических измерениях можно получить равноточные результаты. (Например, при измерении превышений в ходе технического нивелирования, при измерении углов в теодолитном ходе).

Основные свойства случайных погрешностей следующие.

1. Для данных условий измерений случайные погрешности не могут превосходить известного предела.
2. Положительные и отрицательные погрешности, равные по абсолютной величине, встречаются в ряду измерений одинаково часто.
3. Меньшие по абсолютной величине случайные погрешности встречаются чаще, чем большие.
4. Среднее арифметическое из случайных погрешностей стремится к нулю при увеличении числа измерений.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots + \Delta_n}{n} = \frac{[\Delta]}{n} = 0$$

Среднее арифметическое

Пусть для какой-то величины, истинное значение которой X выполнено n измерений и получены результаты измерений $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$.

Можно найти истинные погрешности для данного вида измерений.

$$\Delta_1 = l_1 - X$$

$$\Delta_2 = l_2 - X$$

$$\Delta_3 = l_3 - X$$

.....

$$\Delta_n = l_n - X$$

Сложим левые и правые части этих равенств

$$[\Delta] = [\ell] - nX.$$

В соответствии с четвертым свойством случайных погрешностей измерений

$[\Delta] = 0$ при n стремящемся к бесконечности. Следовательно можно записать

$$\lim X = \frac{[\Delta]}{n} \quad \text{при } n \rightarrow \infty$$

При конечном числе измерений среднее арифметическое из ряда измерений всегда отличается от истинного значения на какую-то величину ε

$$X = \frac{[\Delta]}{n} - \varepsilon$$

В этом случае для получаемого арифметического среднего применяется обозначение x

$$x = \frac{[\Delta]}{n}, \quad \text{где } x = X + \varepsilon$$

Оценка точности результатов измерений

Точность ряда измерений можно оценивать по разным параметрам. Рассмотрим некоторые из них.

1. Средняя погрешность Θ . Она вычисляется как среднее арифметическое из абсолютных значений истинных случайных погрешностей

$$\Theta = \frac{[\Delta]}{n}$$

2. Вероятная погрешность Γ . Если абсолютные значения погрешностей измерений расположить в порядке убывания или возрастания, то погрешность располагающаяся в середине этого ряда и будет вероятной погрешностью. Т.е. это погрешность, больше и меньше которой по абсолютной величине погрешности равновероятны. Если средними в ряду окажутся две погрешности, то вероятной погрешностью ряда будет среднее из их абсолютных значений.

3. Средняя квадратическая погрешность Π .

Понятие введено К.Ф.Гауссом. Формула для вычисления средней квадратической погрешности следующая

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}, \quad \text{где } [\Delta^2] = \Delta^2_1 + \Delta^2_2 + \Delta^2_3 + \dots + \Delta^2_n.$$

По сравнению с предыдущими критериями оценки точности она более эффективна и устойчива. Т.е. средняя квадратическая чувствительна к *большим* по абсолютной величине случайным и мало меняется с изменением числа измерений.

Пример. Пусть даны два ряда случайных погрешностей измерений

I ряд: -1 +4 -3 +1 -2 +1 0 -4 +3 -2

II ряд: -2 -1 +7 -2 +1 0 -5 0 +3 0

Вычисляем средние погрешности $\Theta_I = 2,1$; $\Theta_{II} = 2,1$ – получается, что результаты измерений равноточны.

Вычисляем вероятные погрешности $\Gamma_I = 2$; $\Gamma_{II} = 1,5$ получается, что результаты измерений второго ряда точнее, чем первого.

Вычисляем средние квадратические погрешности

$m_I = 2,5$; $m_{II} = 3,0$ которые показывают, что результаты первого ряда более точные, чем второго. И действительно, во втором ряду больший разброс в значениях погрешностей.

4. Предельная погрешность. В ходе геодезических работ очень важно своевременно обнаружить результаты измерений, содержащие грубые погрешности, с тем чтобы устранить их из дальнейшей обработки и заменить их более качественными результатами.

Опыт большого числа измерений показывает, что в ряде случайных погрешностей только 5 из 100 погрешностей могут превышать двойную среднюю квадратическую погрешность и только 3 из 1000 погрешностей могут превосходить тройную среднюю квадратическую погрешность. Поэтому в качестве предельной погрешности $\Delta_{пред.}$ принимают значение

$$\Delta_{пред.} = 2 m \quad \text{или} \quad \Delta_{пред.} = 3 m$$

Например, средняя квадратическая погрешность определения превышений на 1 км хода технического нивелирования 25 мм, а предельная 50 мм. Поэтому предельно допустимая невязка превышений хода технического нивелирования вычисляется по формуле $f_{h_{max}} = 50 \text{ мм} \sqrt{L}$, где L – длина хода в км.

При проложении теодолитного хода средняя квадратическая погрешность измерения одного угла теодолитом Т-30 составляет 30", а предельная принимается 1',5.

Все измерения с погрешностями более $\Delta_{пред.}$ отбрасываются как грубые и повторяются заново.

5. Абсолютные и относительные погрешности.

По форме выражения погрешности разделяют на абсолютные и относительные. Абсолютные погрешности выражаются в тех же единицах измерения, что и измеряемая

величина, поэтому погрешности: средняя, вероятная, средняя квадратическая, предельная — абсолютные погрешности.

Относительная погрешность f отн. — число показывающее отношение абсолютной погрешности к значению измеряемой величины L .

Относительная погрешность применяется для оценки точности измерения расстояний, площадей, объемов. Абсолютная погрешность применяется для оценки точности измерения углов.

§ 57. Средняя квадратическая погрешность функции измеренных величин.

До сих пор речь шла об оценке точности непосредственно измеренных величин. Часто определяемая величина является функцией других непосредственно измеряемых величин. В этом случае возникает вопрос об определении средней квадратической погрешности функции измеренных величин. Например, известны основание a и высота h треугольника, измеренные со средними квадратическими погрешностями m_a и m_h ; найти среднюю квадратическую погрешность площади треугольника m_s .

В теории вероятностей известна формула для вычисления средней квадратической погрешности функции независимо измеренных величин. Пусть дана функция

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — независимо измеренные величины; их дисперсии будут равны $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$. Дисперсия функции такого вида будет

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_n^2. \quad (50)$$

На практике вместо дисперсий пользуются квадратами средних квадратических погрешностей и вместо формулы (1) используют формулу

$$m_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 m_n^2 \quad (51)$$

Вернемся к примеру с вычислением средней квадратической погрешности площади треугольника. Площадь треугольника S определяется по известной формуле

$$S = \frac{1}{2} ah$$

Используем формулу (51). Средняя квадратическая погрешность площади будет определяться выражением

$$m_x = \sqrt{\left(\frac{1}{2}h\right)^2 m_a^2 + \left(\frac{1}{2}a\right)^2 m_h^2}.$$

§ 58. Средняя квадратическая погрешность арифметического среднего.

В случае равноточных измерений арифметическое среднее вычисляется по формуле

$$\bar{x} = \frac{[l]}{n},$$

где $[l]$ - сумма результатов измерений; n — их число.

Выражение (3) можно записать иначе —

$$\bar{x} = \frac{1}{n}l_1 + \frac{1}{n}l_2 + \dots + \frac{1}{n}l_n.$$

Средняя квадратическая погрешность функции такого вида будет

$$m_x^2 = \left(\frac{1}{n}m_1\right)^2 + \left(\frac{1}{n}m_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{n}m_n\right)^2.$$

Учитывая, что измерения равноточные — $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$, получим

$$m_x^2 = \frac{m^2}{n},$$

или иначе

$$M = m_x = \frac{m}{\sqrt{n}}.$$

Средняя квадратическая погрешность арифметического среднего в корень квадратный из числа измерений меньше средней квадратической погрешности любого из результатов, из которых получено арифметическое среднее.

Формула Бесселя

При вычислении средней квадратической погрешности по формуле

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}}$$

предполагается, что известно точное значение измеряемой величины, а случайные ошибки находят по формулам

$$\Delta_1 = l_1 - X;$$

$$\Delta_2 = l_2 - X;$$

.....

$$\Delta_n = l_n - X.$$

Часто значение измеряемой величины неизвестно, и в качестве него используют арифметическое среднее \bar{x} .

В этом случае вычисляют отклонения v_i результатов измерений от арифметического

среднего (иногда v_i - называют вероятными погрешностями):

$$\begin{aligned} v_1 &= l_1 - X; \\ v_2 &= l_2 - X; \\ &\dots\dots\dots (52) \\ v_n &= l_n - X. \end{aligned}$$

После суммирования левых и правых частей равенства (52) получаем $[v] = [l] - n\bar{x}$.

Но ранее было сказано, что $\bar{x} = \frac{[l]}{n}$ или $n\bar{x} = [l]$, следовательно $[v] = 0$.

Сумма уклонений от арифметического среднего всегда равна нулю.

Вычитаем почленно из (4) равенства (5), получаем:

$$\begin{aligned} \Delta_1 - v_1 &= \bar{x} - X; \\ \Delta_2 - v_2 &= \bar{x} - X; \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_n - v_n &= \bar{x} - X. \end{aligned}$$

Ранее было отмечено, что $(\bar{x} - X)$ - некоторая малая величина ε , поэтому

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= v_1 + \varepsilon; \\ \Delta_2 &= v_2 + \varepsilon; \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta_n &= v_n + \varepsilon. \end{aligned}$$

После возведения обеих частей этих равенств в квадрат и сложения получаем

$$[\Delta^2] = [v^2] + n\varepsilon^2 + 2\varepsilon[v].$$

Поскольку $[v] = 0$, можно записать

$$[\Delta^2] = [v^2] + n\varepsilon^2$$

или иначе

$$\frac{[\Delta^2]}{n} = \frac{[v^2]}{n} + \varepsilon^2. \quad (53)$$

Можно заменить $\frac{[\Delta^2]}{n} = m^2$; величина ε неизвестна и ее можно заменить средней

квадратической погрешностью арифметической середины -

$$\varepsilon = M = \frac{m}{\sqrt{n}}.$$

Следовательно, выражение (53) можно записать следующим образом:

$$m^2 = \frac{[v^2]}{n} + \frac{m^2}{n} \text{ или}$$

$$m^2 n - m^2 = [v^2].$$

$$\text{Поэтому получаем } m = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}}.$$

Это и есть формула Бесселя. Отметим здесь, что при увеличении числа измерений формула Бесселя идентична формуле Гаусса.

§ 59. Оценка точности по разностям двойных равноточных измерений.

В практике геодезических измерений для исключения грубых процессов одну и ту же величину измеряют, как минимум, два раза. Допустим, что каждая величина каждого ряда измерена дважды и все измерения равноточны (например, значения горизонтальных углов, полученные из двух полуприемов), требуется определить среднюю квадратическую ошибку одного измерения. Итак, имеется ряд двойных равноточных измерений $l_1, l'_1; l_2, l'_2; \dots; l_n, l'_n$.

Найдем разности

$$d_1 = l_1 - l'_1;$$

$$d_2 = l_2 - l'_2;$$

.....

$$d_n = l_n - l'_n;$$

Если бы измерения были точными, то разности двойных измерений были бы равны нулю, поэтому можно записать

$$\Delta_{d_1} = d_1 - 0 = d_1;$$

$$\Delta_{d_2} = d_2 - 0 = d_2;$$

.....

$$\Delta_{d_n} = d_n - 0 = d_n$$

Среднюю квадратическую погрешность одной разности получим по формуле

$$m_d = \sqrt{\frac{[d^2]}{n}}. \quad (54)$$

Разность d есть функция двух равноточных измерений —

$$d = l' - l''.$$

Следовательно, $m_d = m\sqrt{2}$, где m — средняя квадратическая погрешность одного измерения, т.е.

$$m = \frac{m_d}{\sqrt{2}}.$$

Теперь подставим сюда значение m_d из выражения (54) и получим

$$m = \sqrt{\frac{[d^2]}{2n}}. \quad (55)$$

Средняя квадратическая погрешность среднего из двух измерений будет равна

$$m_{\text{ср}} = \frac{m}{\sqrt{2}} \text{ или } m_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{[d^2]}{4n}}. \quad (56)$$

Формулы (55) и (56) можно использовать для вычисления средних квадратических погрешностей в том случае, если в разностях d нет систематических ошибок. Если же в измерениях имеется систематическая ошибка, ее можно найти по формуле

$$\theta = \frac{[d]}{n}.$$

В случае, когда θ отклоняется от нуля на пренебрегаемо малую величину - систематическая ошибка отсутствует, но если $\theta \neq 0$, необходимо исключить значение θ из разностей двойных измерений. Вычисляют остаточные разности

$$d'_i = d_i - \theta.$$

Остаточные разности d'_i аналогичны вероятнейшим ошибкам $[d'] = 0$, поэтому средние квадратические ошибки можно вычислить по формулам

$$m = \sqrt{\frac{[d'^2]}{2(n-1)}}; \quad m_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{[d'^2]}{2(n-1)}}.$$

§ 60. Неравноточные измерения. Понятие о весе.

До сих пор мы рассматривали равноточные измерения, т.е. измерения выполненные в одинаковых условиях. Однако на практике очень часто измерения выполняются не в одинаковых условиях и им соответствуют разные средние квадратические погрешности. Поэтому такие измерения называются неравноточными. Неравноточные измерения обладают разной надежностью, разной степенью доверия.

Весом называется надежность результата измерений, выраженная числом. Чем надежней результат, тем больше его вес. Таким образом, вес связан с точностью результата измерения, которая определяется средней квадратической погрешностью. Вес результата измерения обратно пропорционален квадрату средней квадратической погрешности и определяется по формуле

$$p = k/m^2.$$

где k - постоянная величина (коэффициент пропорциональности, который вводится для облегчения вычислений); m — средняя квадратическая погрешность измерения.

Если имеются результаты неравноточных измерений l_1, l_2, \dots, l_n и их средние квадратические погрешности m_1, m_2, \dots, m_n , можно вычислить веса этих измерений

$$p_1 = k/m_1^2; p_2 = k/m_2^2; \dots; p_n = k/m_n^2.$$

Например, пусть имеем результаты измерений l_1 и l_2 и их средние квадратические погрешности $m_1=4$ и $m_2=12$. Вычислим веса этих результатов

$$p_1 = k/16; p_2 = k/144.$$

Примем $k = 144$, тогда $p_1 = 9, p_2 = 1$.

Можно было бы принять $k = 16$, тогда $p_1 = 1; p_2 = 1/9$, т.е. соотношение весов не меняется.

Здесь важно отметить, что результаты равноточных измерений имеют равные веса.

Вес арифметического среднего

Вес арифметического среднего P можно определить по формуле

$$P = k/M^2,$$

где M - средняя квадратическая погрешность арифметического среднего. Напомним, что

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

где m - средняя квадратическая погрешность отдельного результата равноточных измерений, следовательно, можно записать

$$P = \frac{kn}{m^2}.$$

Но в свою очередь $k/m^2 = p$ - вес одного измерения, который можно принять за единицу - $p = 1$. Таким образом, получим $P = n$. Следовательно, при равноточных измерениях вес арифметического среднего равен числу измерений, из которых оно получено.

Средняя квадратическая погрешность единицы веса

Если принять вес результата какого-либо измерения (в ряду результатов неравноточных измерений) равным единице, и обозначить через μ его среднюю квадратическую погрешность, то можно записать

$$1 = k/\mu^2 \text{ или } \mu^2 = k.$$

Общее выражение веса в этом случае можно представить в виде

$$p_1 = \mu^2/m_1^2. \quad (57)$$

Величина μ называется средней квадратической погрешностью единицы веса.

Весовое среднее

Предположим, что имеются результаты неравноточных измерений одной и той же величины l_1, l_2, \dots, l_n и веса этих результатов p_1, p_2, \dots, p_n . Каждый из результатов можно представить как среднее арифметическое из p_i равноточных измерений:

$$l_1 = \frac{[l]_1}{p_1}; \quad l_2 = \frac{[l]_2}{p_2}; \quad \dots; \quad l_n = \frac{[l]_n}{p_n}.$$

Среднее арифметическое из всех результатов измерений будет равно

$$L = \frac{[l]_1 + [l]_2 + \dots + [l]_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n}.$$

Можно записать $[l]_1 = l_1 p_1, [l]_2 = l_2 p_2, \dots, [l]_n = l_n p_n$, следовательно

$$L = \frac{l_1 p_1 + l_2 p_2 + \dots + l_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} \quad \text{или} \quad L = \frac{[lp]}{[p]}.$$

Вес весового среднего равен сумме весов результатов измерений, из которых оно получено $P = [p]$.

Если через M_0 обозначить среднюю квадратическую погрешность весового среднего, то из формулы (57) можно записать

$$P = \frac{\mu^2}{M_0^2} \quad \text{или} \quad M_0 = \frac{\mu}{\sqrt{P}}.$$

Учитывая, что $P = [p]$, получим $M_0 = \frac{\mu}{\sqrt{[p]}}$.

Средняя квадратическая погрешность весового среднего в корень квадратный из суммы весов меньше средней квадратической погрешности результата, вес которого равен единице.

§ 60. Примеры обработки в оценке точности результатов измерений.

Пример 1. Для измерения горизонтальных углов в теодолитном ходе используется теодолит Т30. Средняя квадратическая погрешность измерения горизонтального угла одним полным приемом теодолитом Т30 равна $m_0 = 30''$.

Требуется определить допустимую невязку (предельную погрешность) в сумме углов замкнутого теодолитного хода.

Сумма углов теодолитного хода —

$$\sum_{i=1}^n \beta = \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n.$$

где n - число углов в теодолитном ходе.

В результате применения формулы (51) запишем

$$m_{\sum_1^n}^2 = m_1^2 + m_2^2 + \dots + m_n^2.$$

Учитывая, что $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m_p$ (измерения равноточные), получаем

$$m_{\sum_1^n}^2 = m_p^2 n \text{ или } m_{\sum_1^n} = m_p \sqrt{n}.$$

Примем $\Delta_{\text{пред}} = 3m$, тогда $\Delta_{\text{пред}} = 3m_p \sqrt{n}$. В угловых измерениях принято предельную ошибку обозначать как допустимую невязку $\Delta_{\text{пред}} = f\beta_{\text{доп}}$; здесь же напомним, что $m_p = 30''$, тогда

$$f\beta_{\text{доп}} = 1,5' \sqrt{n}.$$

Пример 2. Даны результаты равноточных измерений одного и того же превышения (табл. 20). Необходимо найти среднее арифметическое, среднюю квадратическую погрешность одного измерения и среднюю квадратическую погрешность среднего арифметического.

Вычисляем среднее арифметическое по формуле

$$\bar{x} = l_0 + \frac{[\varepsilon]}{n},$$

Таблица 20

Обработка результатов равноточных измерений

Номер измерения	Результат измерения l , мм	ε , мм	ν , мм	ν^2
1	1043	+06	+03	9
2	1040	+03	00	0
3	1039	+02	-01	1
4	1038	+01	-02	4
5	1037	00	-03	9
6	1041	+04	+01	1
7	1042	+05	+02	4
	$l_0 = 1037$	$[\varepsilon] = +21$	$[\nu] = 00$	$[\nu^2] = 28$

где l_0 - условное среднее; ε - отклонение от условного среднего; $\bar{x} = 1037 + 21/7 = 1040$. Далее находим отклонения от арифметического среднего по формуле $\nu_i = l_i - \bar{x}$.

Вычисляем ν_i^2 и $[\nu^2]$. Средняя квадратическая погрешность измерения будет равна

$$m = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}} = \sqrt{\frac{28}{6}} = 2,1 \text{ мм.}$$

Средняя квадратическая погрешность среднего арифметического –

$$M = \frac{m}{\sqrt{n}} = \frac{2,1}{\sqrt{7}} \approx 1 \text{ мм}$$

Пример 3. Ниже приведены значения разностей результатов двойных измерений сторон теодолитного хода. Необходимо вычислить среднюю квадратическую погрешность одного измерения, среднюю квадратическую погрешность значения линии среднего из двух измерений и относительную среднюю квадратическую погрешность среднего, если длины сторон теодолитного хода равны примерно 200 м.

Номер линии.....	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	
d	+15	-10	+12	-14	+03	
d^2	225	100	144	196	9	
Номер линии.....		6-7	7-8	8-9		$n=8$
d		-05	+07	-08		$[d]=00$
d^2		25	49	64		$[d^2] = 812$

Сумма разностей d равна нулю, поэтому можно считать, что результаты измерений не содержат систематических погрешностей. По формуле (55) находим среднюю квадратическую погрешность одного измерения

$$m = \sqrt{\frac{812}{2 \times 8}} = 7,1 \text{ см.}$$

Средняя квадратическая погрешность среднего из двух измерений –

$$m_{\text{ср}} = \frac{7,1}{\sqrt{2}} = 5,0 \text{ см.}$$

Относительную среднюю квадратическую погрешность среднего вычислим следующим образом

$$\frac{m_{\text{ср}}}{S} = \frac{0,05m}{200m} = \frac{1}{4000}.$$

Пример 4. При выполнении тахеометрической съёмки превышения точек определяют по формуле

$$h = \frac{1}{2} D \sin 2\nu + a - l,$$

где величина D определяется по нитяному дальномеру; ν - угол наклона (измеряется по вертикальному кругу теодолита); a - высота теодолита над точкой стояния; l - высота визирной цели. Найти среднюю квадратическую погрешность определения превышения.

Ошибки измерения высоты теодолита и высоты визирной цели не превышают 1 см, и их можно не принимать во внимание. Используя формулу (51), получаем

$$m_h^2 = \left(\frac{dh}{dD}\right)^2 m_D^2 + \left(\frac{dh}{d\nu}\right)^2 \frac{m_\nu^2}{\rho^2}$$

или

$$m_h^2 = \left(\frac{1}{2} \sin 2\nu\right)^2 m_D^2 + (D \cos 2\nu) \frac{m_\nu^2}{\rho^2}. \quad (58)$$

Примем для данных условий $m_\nu = 30''$, $m_D/D = 1/300$, $D = 100$ м, $\nu = 3^\circ$. Тогда по формуле (58) получим: $m_h = 2,2$ см, а предельная погрешность $\Delta_h = 2m = 4,4$ см.

Подписано в печать . Формат 60x90/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. п.л.

Тираж 30 экз. Заказ № 754

Отдел оперативной полиграфии РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина
119991, Москва, Ленинский просп., 65.

Тел. (095) 930-93-49