



С.Н. Ходоров

ГЕОДЕЗИЯ - это очень просто

Введение
в специальность



Инфра-Инженерия

С.Н. Ходоров

ГЕОДЕЗИЯ – ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО

Введение в специальность

Учебное пособие

**Инфра-Инженерия
Москва
2013**

УДК 624.131.32 (075)

ББК 26.1я7

X69

Ходоров С.Н.

X 69 Геодезия – это очень просто. Введение в специальность.
– М.: Инфра-Инженерия, 2013. – 176 с.

ISBN 978-5-9729-0063-3

Книга прежде всего предназначена для молодых людей, которые стоят на перепутье выбора профессии. Именно для них в простой, доступной и популярной форме повествуется об основах системы знаний, называемых геодезией. В то же время эта книга не для «чайников», которым важно быстро и эпизодически выхватить фрагмент какой-то информации. Она ориентирована на серьёзного читателя, заинтересованного открыть для себя новую инженерную дисциплину.

При всей контактности, демократизме и непринуждённости изложения начал геодезии, автор не нарушал научных и инженерных принципов интерпретации данных, входящих в сюжет этой книги. При этом основное внимание было уделено разъяснению магистральной составляющей предмета геодезии – методологии создания топографической карты.

© Ходоров С.Н., автор, 2013

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2013

ISBN 978-5-9729-0063-3

Об авторе

Ходоров Самуил Наумович родился в 1948 году в Украине в городе Львове. В 1973 году окончил Львовский ордена Ленина политехнический институт по специальности "Астрономо-геодезия". После окончания института работал на различных инженерных должностях в экспедициях Главного управления геодезии и картографии при Совете министров СССР и в институтах проектно-изыскательского профиля. С 1979 года занимался преподавательской и научно-исследовательской работой на кафедре геодезии и земельного кадастра Львовского сельскохозяйственного института в должностях старшего преподавателя и старшего научного сотрудника. В 1986 году защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук. В 1988 году – генеральный директор научно-производственного кооперативного предприятия "Изыскатель". С 1990 года живёт в Израиле, где в 1991 году получил третью академическую степень с присуждением звания доктора наук (PhD). Работал главным геодезистом министерства строительства Израиля, в настоящее время работает начальником отдела геодезических земельнокадастровых измерений Национального института геодезии и картографии Израиля. Начиная с 1994 года по настоящее время ведёт лекционные курсы по различным геодезическим дисциплинам в Хайфском университете, Ариэльском университете, в академических колледжах Тель-Авива, Ашдода и Беер-Шевы. По результатам научных исследований опубликовано в различных журналах и сборниках более 50 научных статей. С 2011 года член Международной федерации русскоязычных писателей.

Слово к читателю

Дорогой коллега! Именно так я называю читателя, который возложил на себя нелёгкую миссию открыть первую страницу этой книги. С этой минуты, мы вместе с тобой в одной неразрывной связке вступаем на тропу познания одной из древнейших наук на земле, призванной измерять её как в целом, так и по частям. С этого мгновения мы, уважаемый коллега, становимся единомышленниками, сопричастными к таинственному древу познания истины. Одной из ветвей этого дерева и является система знаний, называемая *геодезией*.

В наших современных реалиях практически каждый человек знаком с основными понятиями математики, физики, химии, электроники и программирования. Но далеко не все знают, что являет собой знание, именуемое геодезией. Поэтому главная цель этой книги - в доступной форме ввести моего виртуального собеседника в непростой мир теории и практики современных измерений, проводимых на нашей прекрасной планете Земля. Ключевой составляющей этого введения я выбрал принцип: «меньше – невозможно, а больше – неразумно». На самом деле, неразумно для начинающих, для знакомящихся с азами этой увлекательной науки, и целесообразно для заинтересованных углубить свои стартовые знания.

До сих пор помню, как много лет назад, будучи студентом геодезического факультета, я слушал лекции по физике. Седовласый профессор выписывал на доске беспредельную громаду математических формул. Стараясь вникнуть в суть этого нескончаемого алгебраического бастиона, мы забывали о сути самого физического явления, для понимания которого эти формулы и были предназначены. Поэтому в своей книге, несмотря на то, что именно геодезия дала толчок зарождению математической науки, я стремился к минимальной подаче сложных формул, чтобы из-за их дремучих древосплетений всё-таки ясно видеть изучаемый лес.

И ещё один маленький экскурс в прошлое, на котором, как

известно, зиждется настоящее. В далёкие 70-годы прошлого столетия один из изучаемых в университете курсов назывался «радио- и светодальномерные геодезические измерения». Этой дисциплине предшествовал другой базовый курс «радиотехника и электроника», который, собственно, был направлен на изучение основ и принципов, необходимых для успешного постижения последующего курса. Лекции по радиоэлектронике читал знающий и перспективный доцент, который, к сожалению, на весь длинный семестр забыл, что в аудитории сидят не будущие радиоинженеры и электронщики, а студенты, осваивающие поистине земную профессию геодезиста. Сложные лабиринты радиосхем, запутанная паутина электронных цепей, преломлённых через теоретические принципы электротехнических законов, излагаемые доцентом, внесли в мозговые извилины будущих геодезистов немыслимую и малопонятную абракадабру. Штудирование доброго десятка рекомендованных и написанных специфическим научным языком учебников не внесло ясность в постижение изучаемого. Трудно сказать, чем бы закончилась эта радиоэлектронная эпопея, если бы за несколько дней до экзамена мне не попались на глаза в одном из книжных магазинов два худосочных издания. Магические заголовки книг французских авторов Е. Айсберга и Ж. Эймишена сразу же привлекли моё внимание. Они назывались: «Радио? Это очень просто!» и «Электроника? Нет ничего проще!». Отсюда, сознаюсь, истоки компилированного названия настоящей книги. Но как бы там ни было, эти популярные и вместе с тем научные, занимательные и при этом серьёзные, доходчивые и остроумные книги в течение нескольких дней помогли мне легко освоить и глубоко понять непростую теорию современной радиотехники и электроники. Именно этими принципами, только применительно к геодезии, автор руководствовался при составлении настоящей книги. А экзамен по радиотехнике и электронике я сдал на отлично. Отсюда вытекает ещё один основополагающий принцип моей книги: «обучение не через запоминание или зазубривание, а исключительно посредством собственного понимания».

И ещё один прагматический взгляд на ипостась накопления знаний и на качество обучения. Практически на всех факультетах советских технических университетов изучался затяжной пятисеместровый курс дифференциального и интег-

рального исчисления по тысячестраничному (в двух необъятных томах) учебнику Н. С. Пискунова с одноименным названием. К этому необозримому учебнику в качестве практикума рекомендовалось прекрасное, однако также необозримое пособие И. А. Каплана (три тома, пять частей, 1488 страниц) под названием «Практические занятия по высшей математике». Ни в коей мере не умаляя достоинств авторитетных и профессиональных авторов этих изданий и ещё в большей мере не сомневаясь в компетентности уважаемых профессоров, которые читали нам лекции по высшей математике, должен всё-таки усомниться в правильности выбранного подхода. Дело даже не в массивности и тяжеловесности поданного материала, не в рассеивании и некой пульверизации обучаемого, а, пожалуй, в том, что будущих инженеров готовили скорее стать рутинными математическими клерками, чем быть способными к внятному осмысливанию конкретной задачи. Попросите любого инженера, нет, нет, не дать определение дифференциала или интеграла (вы его, наверняка, получите), а доходчиво объяснить смысл и суть этих фундаментальных математических понятий. Поверьте, что мало от кого вы услышите вразумительный ответ. Зато большинство из них по сей день помнят табличные интегралы, а многие без особого напряжения смогут вычислить производную или интеграл по заученным мнемоническим правилам. Другими словами, никто не захотел или не сумел взять на себя нелёгкий труд вразумительно даже не объяснить, а, скорее, растолковать, интерпретировать, иллюстрировать, разжевать, мотивировать и вдолбить сущность, ядро, сердцевину, в конце концов, центр тяжести, субстанцию или квинтэссенцию изучаемых понятий. Вместо этого вышеупомянутому инженеру внушили классическое и невразумительное определение, что неопределённым

интегралом $\int f(x)dx$ называется множество $F(x)+C$ всех первообразных функций для данной функции $f(x)$, где C принимает все возможные числовые значения или, ещё лучше, что неопределённым интегралом называется любая функция, дифференциал которой равен подынтегральному выражению, а производная равна подынтегральной функции. Не правда ли: всё беспредельно понятно, а точнее, предельно непонятно. А если бы обучившийся и имеющий учёную степень магистра инженер, действительно, понимал бы, о чём идёт речь, он бы

наверняка ненавязчиво поведал своему сыну-студенту следующее. В понятии интеграл ключевым является слово «сумма» в несколько расширенном его рассмотрении и что в конечном итоге интеграл – это естественный аналог суммы числовой последовательности, суммы маленьких-маленьких, бесконечно маленьких кусочков сложной функции. Вот и всё, пусть не строго, пусть несколько упрощённо, зато максимально понятно. И только потом, можно усложнять, дотачивать и постепенно приближаться к научной градации формулировок и понятий. Вышеотмеченное и послужило третьим принципом моей книги: суперпонимание через чёткое, конкретное, логичное, выразительное и убедительное объяснение, как это превосходно продемонстрировал в своём уникальном и потрясающем учебнике английского языка петербургский профессор Александр Драгункин.

Итак, дорогой коллега, если три принципа, на которых построена эта книга, показались тебе весомыми и достаточно обоснованными, то приятного и созидательного путешествия тебе по страницам этого учебного пособия. Это нелёгкое и увлекательное путешествие для тех, кто решил в палящий зной и холодную стужу, в промозглый дождь и в ураганный ветер проложить свою ещё неисхоженную тропу в скалистых горах и дремучей тайге, в бескрайней степи и желтеющей тундре с единственной и возвышенной целью нанести на карту отечества всё, что создано природой и человеком.

В заключение выражаю искреннюю признательность моему коллеге, доктору геодезии Б. А. Браверману (Канада), взвалившему на себя нелёгкую работу рецензирования этой книги. Глубокая благодарность инженеру-геодезисту Г. Я. Шлайну (Израиль) за ценные замечания, способствующие улучшению изложения и содержания представленного учебного пособия.

*«Геодезия представляет одну из
полезнейших отраслей знания:
всё наше земное существование
ограничено пределами Земли,
и изучать её вид и размеры
человечеству также необходимо,
как человеку ознакомиться
с подробностями своего жилья».*
(В. В. Витковский, учёный геодезист)

ГЛАВА 1 ЧТО ТАКОЕ ГЕОДЕЗИЯ

Определение, понятия, концепция, стратегия, тактика и философия

*Здесь комментарии излишни:
Чтоб трассу жизни изыскать,
Доверил нам господь всевышний
Планету нашу измерять.*

Любая наука начинается с определения предмета, который она изучает. Но если на первой странице учебника автор стремится дать полновесное и сложное определение, он отпугивает начинающего читателя продолжать обучение. И это, как раз то, чем мне не хотелось бы заниматься. Посудите сами. В одном из уважаемых учебников по математике она определяется так: математика – это наука, основанная на решении задач о количественных и пространственных соотношениях реального мира путём идеализации необходимых для этого свойств объектов и формализации этих задач. При таком начале, мне кажется, что даже Карл Гаусс и Рене Декарт вряд ли отважились бы избрать профессию математика. А вот вам и определение предмета геодезии, взятое из одного из лучших и компетентных учебников: **геодезия** – наука об измерениях, средствах измерений и математической обработке результатов этих измерений, выполняемых для решения научных, производ-

ственных и оборонных задач: для определения формы, размеров и гравитационного поля Земли, планет и спутников Солнечной системы, для определения координат точек на поверхности Земли и в околоземном пространстве, для создания планов, карт, профилей и математических моделей местности, для выполнения инженерно-геодезических работ при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Самое удивительное, что в этом громоздком и более, чем пространном определении с теоретической точки зрения всё правильно и законно. Как говорится, из песни слов не выкинешь. А может быть при сохранении мотива изменить аранжировку мелодии. Давайте попробуем. Ведь правильная постановка задачи гарантирует как минимум половину успеха при её решении. Сосредоточимся на двух кардинальных задачах геодезии. Первая из них заключается в создании карты участка земной поверхности на основе выполненных измерений. Речь идёт о фиксации элементов местности с последующим преобразованием их в наглядное и удобное плоскостное отображение. Вторая задача является обратной вариацией первой: объекты, нанесённые на карту (это могут быть запроектированные здания, сооружения, дороги, коммуникации и т.д. и т.п.), опять-таки методами измерений переносятся на местность. В обоих случаях ключевым словом здесь является слово *измерение*. Таким образом, на первом этапе определим геодезию как науку об измерении земной поверхности. По мере углубления изучения предмета, будем дополнять это определение последующей информацией. Данная простая формулировка не надумана, она взята всего-навсего из синхронного перевода с греческого, где *geo* – это земля, а *desio* – разделяю. Действительно, геодезия зародилась в древние века, ещё до нашей эры, из потребностей землеразделения, а ещё лучше сказать, землеизмерения для разделения земельных участков.

Каждому из вас, дорогой читатель, приходилось видеть на городских улицах, лесных просеках, берегах рек или горных склонах человека, стоящего у массивного деревянного треножника, на котором возвышался, неизвестный вам, измерительный прибор. Зрительная труба этого прибора, как вы замечали, была направлена на красно-белую вежу или на черно-белую шкалу специальной рейки. Вы наверняка догадывались, что происходит загадочный, в некоторой мере, таинственный процесс измерений. И выполняется этот процесс, соглас-

но нашему определению, на земной поверхности. Однако не совсем понятно и, более того, совсем не очевидно, что собой представляет эта поверхность в графическом изображении с точки зрения математики. Я подвожу тебя, дорогой коллега, к риторическому и совсем непростому вопросу: а что собственно представляет собой фигура нашей замечательной голубой планеты. Этот вопрос в геодезии считается действительно краеугольным и фундаментальным, поскольку карты, которые являются конечной продукцией геодезических работ, с одной стороны, и непосредственные измерения на местности, с другой стороны, выполняются, как правило, в разных отсчётных блоках. И если мы абсолютно уверены в том, что карта однозначно представляет собой плоскость, то пока неизвестно, что представляет собой поверхность, на которой мы производим измерения. А это крайне важно знать, а ещё лучше, понимать для правильного и необходимого перехода от одного блока к другому. Не надо пугаться, это совсем не так сложно, как полагают студенты геодезического факультета, когда сдают экзамен по «теории фигуры Земли».

Итак, начинаем разбираться. То, что Земля является не плоскостью, а шаром, нам известно ещё со школьной скамьи. А теперь о том, что неизвестно. Оказывается, истинной моделью Земли *в самом точном и в самом первом приближении* принято считать не идеальный шар, а фигуру, которая называется **геоид**. Чтобы понять, что такое геоид, давайте представим себе поверхность Мирового океана и сообщающихся с ним морей в состоянии полного покоя и равновесия, т.е. в отсутствии приливов, отливов, течений, разностей атмосферных давлений и т.п. Другими словами, у нас получится фигура, которая представляет собой бесконечную поверхность океана, без материков и островов. И если мы мысленно продлим эту поверхность под материками и находящимися на них горами, хребтами, плоскогорьями, возвышенностями и равнинами, то получим поверхность одного и того же уровня, которая и будет представлять собой геоид. Поскольку высота в любой точке геоида равна нулю (ведь по сути это уровень моря или океана), именно от геоида было предложено исчислять высоты точек поверхности Земли. Теперь вы знаете, что все высоты точек, помеченные на топографической карте, есть не что иное, как *геоидальные высоты*. Но это я уже бегу впереди паровоза, который не спеша везёт нас к станции под названием геоде-

зия. О высотах мы поговорим гораздо позже, по мере более глубокого погружения в изучаемый курс. В принципе, геоид представляет собой что-то не совсем круглое и сплюснутое у полюсов, что не представляется возможным описать математическими формулами, как, например, куб, конус или квадрат. Поэтому он применяется в сугубо теоретических и научных расчётах и при составлении карт фактически не используется.

Исходя из отмеченного, для решения практических задач на поверхности Земли, в частности для картографических целей, земная поверхность *во втором приближении* представляется математически описанной геометрической фигурой, которая называется **эллипсоидом вращения** с северным и южным полюсами (рис. 1).

Этот эллипсоид имеет в общем случае три параметра (большая полуось a , малая полуось b и сжатие), подбирая которые можно в большей или меньшей степени приблизить его к геоиду (рис. 2). Как правило, каждая страна имеет свой локальный эллипсоид, параметры которого могут на несколько десятков метров отличаться друг от друга. Однако на современном этапе развития спутниковой геодезии и связанной с ней системой глобального позиционирования GPS возникла необходимость применения эллипсоида, который мог бы подходить для всей планеты в целом. Примером такого глобального эллипсоида является международный эллипсоид WGS-84. Но опять я забежал далеко вперёд, не доехав до конечной

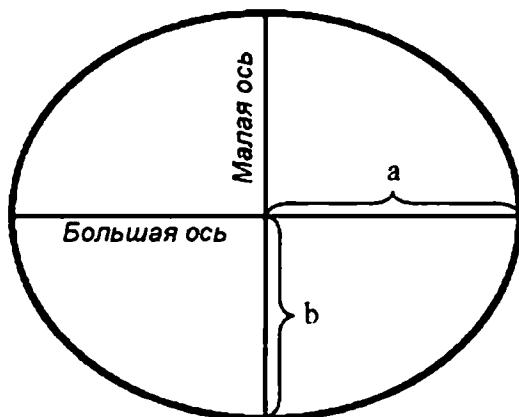


Рис. 1. Эллипсоид вращения

станции, просто современные технологии стремительно наступают на пятки, самым неожиданным образом переминаясь с азами геодезической науки. Но в конце-концов, доберёмся и до этих высоких технологий, а пока вернёмся к азбучным истинам, одна из которых гласит: *измеряя нашу Землю, мы находимся на поверхности эллипсоида в случае, когда территория картографируемой площади превышает площадь, равную 50 000 квадратных километров, т.е., скажем, квадрат со стороной около 225 км.*

Когда же измеряемая площадь меньше указанной выше, мы прибегаем к дальнейшему упрощению (нечего усложнять и так достаточно сложное и стрелять из пушек по воробьям) и вводим *третье приближение*, принимая ту же самую фигуру Земли за обыкновенный **шар**, как учили нас на уроках географии в незабвенной школе. Да и на самом деле, математические выкладки на поверхности шара гораздо проще, чем на поверхности эллипсоидальной. И чтобы, наконец, окончательно облегчить себе жизнь, перейдём к самому простому, *четвёртому приближению* фигуры Земли. Ведь совсем не так часто мы выполняем геодезические измерения на больших и протяжённых территориях. В большинстве случаев инженерной практики

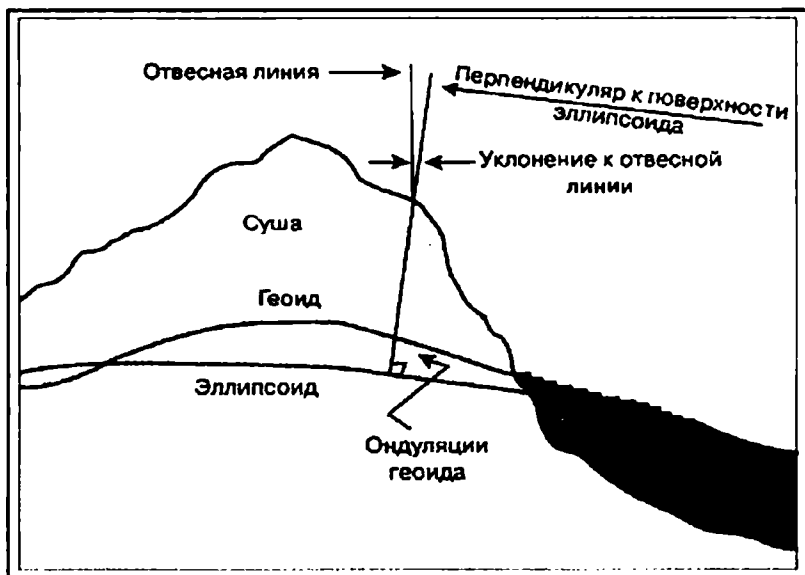


Рис. 2. Понятие о геоиде и эллипсоиде

процесс измерений происходит на строительной площадке, городском квартале или небольшом участке запроектированной трассы. И как показали не очень сложные расчёты, сферичностью (кривизной) Земли можно пренебречь, если мы измеряем территории, площадь которых меньше, чем 380 квадратных километров. В этом случае, с неощутимой для практических целей погрешностью, фигуру Земли можно принять за **плоскость**. Другими словами, измеряя участки земной поверхности размером 20 км·20 км, мы, отбрасывая все сомнения, можем не засорять информационные ячейки наших мозговых извилин, которые нам ещё пригодятся в дальнейшем, геоидальными, эллиптическими и сферическими сложностями.

Сейчас, когда мы уяснили, что ножки штатива геодезического прибора углубляются не просто в землю, а в виртуальный её пласт, который, в зависимости от точностных приближений, можем называть либо геоидом, либо эллипсоидом, либо шаром, и, наконец, плоскостью, представляется возможным подразделить геодезическую науку на две основные ветви. Первая из них – это собственно *геодезия*, в этом случае её иногда называют топография, которая в строгом понимании не является синонимом слова геодезия. Но как бы там ни было, когда мы видим слово геодезия без сопровождающего прилагательного, мы понимаем, что речь идёт об измерениях, проводимых на небольших участках земной поверхности, которые мы принимаем как плоские. При математической обработке результатов таких измерений используются элементарные геометрические и тригонометрические формулы, известные нам из школьных учебников. Да и вообще, следует отметить, что большинство геодезических задач здесь решаются по каноническим алгоритмам аналитической геометрии на плоскости. Во второй ветви, ничего не поделаешь, друзья, к слову геодезия мы прибавим прилагательное *высшая* с единственной благородной целью подчеркнуть, что имеются и высшие материи, которые призвана измерять всё та же геодезия. В этом случае этими материями являются очень большие участки земной поверхности в частности, и даже вся планета Земля в целом, разумеется, с учётом её кривизны и других эллипсоидальных и геоидальных факторов. Именно методами высшей геодезии определили форму и размеры Земли, движение полюсов, смещение береговых линий и частей земной поверхности, изменение уровней морей и океанов и т.д. и т.п.

Остаётся только добавить, что в высшей геодезии все измерения приурочены не к плоскости, а к сфере, и поэтому в математическом плане здесь всецело применяется аппарат дифференциального и интегрального исчисления в применении к пространственной атрибутике. Сразу же поспешу успокоить своих коллег, у которых наверняка учащённо забилося сердце от приведенной мною математической терминологии: в нашем курсе, который по-прежнему я называю введением в специальность, мы ограничимся только широким и разнообразным спектром того, что изучает «*низшая*» геодезия.

Из перечисленных двух ветвей зародился ещё один отрожек, который сегодня, продолжая древесную аналогию, превратился в раскидистую крону, называемую *инженерной* или *прикладной геодезией*, другими словами, геодезией в применении к чему-то. Этим приложением является широкий диапазон инженерных мероприятий, который включает проектирование и строительство промышленных, гидротехнических, энергетических и гражданских сооружений, железных и шоссейных дорог, прокладку нефтепроводов и газопроводов, планировку городских и сельских населённых пунктов, обеспечение сельскохозяйственных и земельнокадастровых работ. Этот список можно продолжать и продолжать. Однако уже с полной уверенностью можно заключить, что инженерная геодезия обслуживает точными измерениями практически все хозяйственные отрасли. Не надо обладать большой фантазией, чтобы понять, что первый колышек на любом инженерном объекте, не в образном, а самом прямом выражении, забивают не геологи, не строители, а именно геодезисты. Да и в самом деле, процессу любого проектирования предшествует составление топографической карты, на которой, собственно, и выполняются проектные работы. Следующим звеном сложной инженерной цепочки является строительство. А тут позвольте спросить, кто осуществляет перенос всего, что запроектировано на карте (зданий, сооружений, плотин, дорог и т.д.) на реальную местность? Ну, конечно же, геодезисты. А кто сопровождает и технологически обеспечивает строительство при возведении заводских корпусов, энергоблоков электростанций, трассирований линий метрополитена, шоссейных дорог и т.п.? Опять-таки, геодезисты. Даже, когда строительство завершилось, работа геодезистов не заканчивается. На основе различных геодезических методик они следят за надёжной и безаварийной эксплуатацией

воздвигнутых сооружений. Сегодня геодезические методы позволяют составить мониторинг прогноза землетрясений и выявить недопустимые вертикальные и горизонтальные смещения фундаментов уникальных сооружений. Трудно переоценить роль геодезии в картографировании как отдельных государств, так и всей Земли в целом. Без применения геодезических методов невозможно решение стратегических и тактических военных задач, в частности, координатная привязка ракетной техники и определение местоположения целей. Разумеется, я перечислил далеко не все области, где используются геодезические измерения, но уверен, что теперь мой читатель нисколько не сомневается, что древняя геодезическая наука равно, как и современные высокие технологии, пронизывает необходимыми измерениями практически все сферы человеческой деятельности.

Двумя предложениями ранее вы, дорогие читатели, возможно, не обратили внимание на два слова, которые, как правило, применяют в военном деле. Эти слова я выделяю курсивом: *стратегия и тактика*. В широком смысле они оптимизируют, как вы догадываетесь, некий переход из настоящего в желаемое будущее. В нашем случае настоящим является совсем небольшая крупица знаний в области геодезии, которую вы уже успели получить на первых страницах этой книги, а будущее – это ясное представление того, что же мы хотим приобрести, когда непременно доберёмся до последней страницы. Если перевести сказанное на доступный человеческий язык, то стратегию можно определить излюбленным вопросом русской интеллигенции – что делать? а тактику – младенческим вопросом – как делать? Итак, чего мы хотим достигнуть? Ранее было подчеркнуто, что важнейшей, чтоб не сказать фундаментальной, задачей геодезии является *составление карты*. Забегая немного вперёд, следует отметить, что процесс создания карты, главным образом, заключается в определении координат (x , y) точек местности (углы домов, столбы линий электропередач, пересечение дорог и т.д.) посредством геодезических измерений. Если это так, а это точно так, то, по сути дела, вся стратегия низшей геодезии прекрасно описывается простой формулой, которую мы чуть позже назовём *прямой геодезической задачей*. В несколько упрощённом виде эта формула представится элементарным выражением:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = f(\beta, D), \quad (1)$$

где x и y – координаты измеряемой точки; β – измеренный угол; D – измеренное расстояние; f – знак функциональной зависимости.

В приведенной формуле всего пять букв, однако именно они символизируют стратегию, которая провозглашает, что координаты точки являются некой функцией от измеренных углов и расстояний. В свою очередь, сам процесс измерений как углов, так и расстояний, безусловно, является тем, что мы называем словом тактика. Как видите, уважаемые господа, всё более чем просто: стратегия – что делать? – получать (вычислять) координаты точек; тактика – как делать? – измерять углы и расстояния. Итак, здесь мы впервые нарушаем индуктивный принцип (от частного к общему), положенный в традиционных учебниках, в которых от измерений переходят к координатам, отражая тем самым реальную действительность. Мы же, на самом деле, декларируем здесь дедуктивный метод обучения (от общего к частному) с единственной целью уже с первых шагов, если хотите, вдолбить читателю конечную цель и, только отталкиваясь от неё, переходить к частностям.

В заключение этой главы, когда мы уже знаем, что изучает геодезия и чем она занимается, мне хотелось бы рассмотреть её концепцию в расширенном ракурсе. В любом случае геодезия, как и любая наука, является отражением какого-то фрагмента окружающего мира. Когда много лет назад, ещё до нашей эры, разливающийся Нил затапливал свои берега, а потом вновь обнажал их, древние египтяне должны были снова и снова измерять свои участки земли и определять их границы. Позже древние греки описали этот процесс и назвали его геодезией. Из рутинной бытовой процедуры, по сути, зародилась наука, которую в разных источниках называют либо геодезией, либо геометрией. Это сегодня эти две смежные веточки, одна из которых называется *землеразделением*, а другая *землеизмерением*, считаются разными науками. Тогда же, подразумевая нечто общее, эти науки представлялись незыблемым принципом установления порядка и закона в мире. Вот так сложно и в то же время просто. Скажите, какая из современных наук может похвастаться такими глубокими корнями?

Электроника, программирование, робототехника? Пожалуй, только геодезия. И недаром древнегреческий философ Платон считал, что геодезия (геометрия) считается универсальным философским языком, он верил, что это отличный способ погружения в философскую медитацию. Поскольку под геодезией мы, прежде всего, понимаем измерения, то здесь уместно привести мнение современных философов. Они как раз и говорят, что «пытаться открывать законы и строить модели различных процессов и явлений, пока нет надёжных и строго обоснованных методов измерений – занятие совершенно бессмысленное и бесполезное, как бы полученные законы и модели ни были стройны и изящны». В нашем случае, именно геодезические измерения и являются, в полном соответствии с вышеприведенной философской фабулой, обоснованием и, если хотите, обеспечением вышеуказанных моделей, в роли которых здесь выступают различные инженерные, научные и технологические проекты.

Да и вообще, продолжая напевать дифирамбы геодезической науке, хотелось бы подчеркнуть, что современное опытное естествознание, начало которому было положено трудами Леонардо да Винчи, Галилея и Ньютона, своим расцветом обязано именно измерениям. Здесь следует вспомнить, провозглашённый Галилеем принцип количественного подхода, согласно которому описание физических явлений должно опираться только на величины, имеющие количественную меру. Именно этот принцип, в основе которого заложен сложный процесс измерений, и стал методологическим фундаментом не только естествознания, а и всего мирового прогресса. Вот так, дорогие коллеги, не больше и не меньше. И, наконец, отбросив словесные хитросплетения и сложности в сторону, заключим, в конечном итоге, что измерения – это совокупность действий, выполняемых при помощи определённых средств с целью нахождения числового значения измеряемой величины в принятых единицах. Определяющим здесь является понимание: для чего, что и чем измерять. Ответам на эти ключевые вопросы как раз и посвящены последующие страницы этой книги.

ГЛАВА 2 ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ АКСЕССУАРЫ

Геодезический датум, системы координат, понятие о картографической проекции, концепция ориентирования направлений, прямая и обратная геодезические задачи, горизонтальное проложение линий

*Палатка, горы, звук гитары,
Координатные системы.
Есть на земле аксессуары
И геодезии проблемы.*

В заголовке этой главы я использовал, возможно, «мудрёное» слово аксессуар, и отнюдь не потому, что захотел блеснуть лёгким французским прононсом. Скорее всего, в богатом русском языке не нашлось такого яркого слова, которое столь выразительно отражает принадлежности и детали, сопровождающие или сопутствующие чему-то главному. Главное, в нашем случае, это то, что мы изучаем, это геодезия, а одним из сопутствующих ей факторов, одним из аксессуаров, с которого мы, собственно, и начинаем наше повествование, является термин **геодезический датум**.

Сразу наберусь смелости заявить, что геодезический датум – это одно из самых расплывчатых понятий в современной геодезии. Попытаемся всё-таки постигнуть эту сложность и распутать это недопонимание пресловутого датума. Дело в том, что множество форумов в Интернете изобилуют вопро-

сами от пользователей современных GPS – навигаторов, связанных с геодезическим датумом. И эти самые пользователи этих самых навигаторов никак не могут понять, почему координаты какого-нибудь объекта, полученные посредством GPS, отличаются от координат того же объекта на топографической карте данной страны на десятки метров (теоретически эти отклонения могут достигать и более 100 метров). В предыдущей главе мы начали говорить о том, что в большинстве стран принят свой, так называемый, референц-эллипсоид (от лат. *reference* – вспомогательный). Все эти эллипсоиды различаются между собой, прежде всего, своей геометрией. Вполне понятно, что геометрические отличия в разных эллипсоидах (например, разные длины больших осей) порождают разные системы координат. Если представить себе, что на морских просторах какой-нибудь теплоход пересекает территориальные воды нескольких стран, геодезической основой картографирования которых являются разные эллипсоиды, и штурман этого теплохода, по мере его продвижения вперёд, поочередно использует карты этих стран, то возникает вероятность, что этот корабль могут подстеречь навигационные сложности. Ещё, к сожалению, современный мир постоянно сотрясают войны в различных регионах планеты. Современные военные технологии предусматривают передвижение различных ракетных носителей на значительные и обширные территории, охватывающие эллипсоиды множества стран. Именно по этим и другим причинам, так называемой глобализации, в 80-х годах прошлого столетия была введена всемирная геодезическая система - система координат 1984 года WGS-84 (World Geodetic System), которая представляет собой глобальную опорную систему математической модели Земли. Здесь следует подчеркнуть, что эта система охватывает всю планету. Сегодня в целях навигации и позиционирования именно WGS-84 пользуются в большинстве аэропортов мира. Поскольку к этой системе приклеен ярлык всемирная, то в отличие от большинства референц-эллипсоидов, она называется *геоцентрической*, т.е. начало её координат размещено в центре масс Земли. Да и вполне разумно и естественно, что точка привязки глобального эллипсоида должна находиться в центре планеты, а ось его вращения должна совпадать с осью вращения Земли. Теперь, друзья, после небольшого и не очень лирического отступления, в результате которого, я очень надеюсь, вы постиг-

ли, что в нашем бренном земном мире вращаются разные эллипсоиды, обитающие в разных координатных системах, вернёмся к тому, с чего мы начали. А начали мы с раскрутки понятия геодезический датум. Горюплюсь вам сообщить, коллеги, что по ходу моего отступления, мы это понятие уже практически раскрутили. Одним из видов геодезического датума и является глобальная система WGS-84, к которой, как правило, привязана система глобального позиционирования GPS. Этот датум, действительно, является глобальным, его цель – как можно более точно описать всю земную поверхность. А сейчас, коллеги, будьте внимательны: несмотря на то, что WGS-84 принято называть эллипсоидом, это, скорее, система координат или набор параметров, описывающих эллипсоид под названием GRS-80 (эллипсоид, принятый и рекомендованный для геодезических работ Генеральной ассамблеей Международной Ассоциации Геодезии и Геофизики), это (WGS-84), в конце концов, и есть геодезический датум названного эллипсоида (GRS-80). Таким образом, геодезическим датумом мы будем называть совокупность параметров, принадлежащих рассматриваемому эллипсоиду, и его привязку и ориентацию в теле Земли. Теперь становится понятно, что разные (локальные) референц-эллипсоиды формируют разные датумы. Например, геоцентрический датум (WGS-84) формирует систему отсчёта для определения местоположения объектов на всей поверхности Земли, а локальный датум ориентирует заданный референц-эллипсоид так, чтобы он наилучшим образом описывал поверхность Земли для какой-то конкретной территории. Наконец, чтобы окончательно отвергнуть все сомнения относительно геодезического датума, сформулируем, с некоторым упрощением, окончательно его определение: геодезический датум – это размеры принятого эллипсоида (большая

полуось - a , малая полуось - b , полярное сжатие $\frac{a-b}{a}$).

Внутри каждого геодезического датума закодирована система координат. Давайте разбираться, что это такое. *Координаты в геодезии* – это числа (величины), определяющие положение точки в пространстве или на плоскости. Сразу оговоримся, что под пространством мы будем понимать поверхность планеты, на которой мы живём. Чтобы чётко установить положение точки в этом пространстве, её необходимо привязать

зять к одной из систем координат, каждая из которых характеризуется своими геометрическими особенностями. Вот здесь и начинаются всякие тонкости, которые в традиционных учебниках тщательно затушёвываются сложностью пояснений. В каждом из них справедливо подчёркивается, что системы координат делятся на *географические, астрономические, геодезические и плоские (зональные)*, причём первые три системы, несомненно, относятся к поверхности сферы. Неразбериха заключается в трудностях чёткого и обоснованного различия между этими системами. Попробуем «зарубить» не столько на носу, сколько в подсознании, а ещё лучше в ясном и полном сознании, что положение точки всегда определяется относительно некоторой исходной базисной поверхности. И если таким исходом принимается (вспоминаем уже изученные модели фигуры Земли):

- поверхность геоида, то мы говорим об астрономических координатах;
- поверхность эллипсоида, то мы подразумеваем геодезические координаты;
- поверхность шара, то мы (с некоторым упрощением) рассматриваем географические координаты;
- плоскость, то мы работаем с известными вам прямоугольными координатами.

Неплохо запомнить, а ещё лучше понять, что в первых трёх системах координатами являются знакомые вам ещё из школьного глобуса, испещрённого меридианами и параллелями, *широта и долгота точки земной поверхности*. И что во всех этих случаях исходными для отсчёта широты является плоскость экватора, а для долготы – плоскость начального меридиана. Отметим только, что начальным меридианом мы называем воображаемую линию, соединяющую северный и южный полюса земного шара или эллипсоида, которая проходит через точку во дворе королевской обсерватории (город Гринвич, Англия). Перечисленное является общими параметрами всех трёх систем координат. А теперь о различиях. В астрономической системе координат основным геометрическим критерием является *отвесная линия* к данной точке геоида (рис. 2, рис. 4), в геодезической системе координат – *нормаль (перпендикуляр)* к поверхности эллипсоида в данной точке (рис. 2, рис. 3) и в географической системе координат – *радиус*, проведённый к данной точке сферы (шара). И, в-третьих, нако-

нец, всегда можно сказать, что широты и долготы будут *астрономическими*, если они находятся из астрономических наблюдений по небесным светилам, и *геодезическими* при получении из соответствующих вычислений по измерениям на Земле (принцип этих вычислений будет рассмотрен по ходу дальнейшего изложения). После столь детального объяснения, с целью придать системам координат законный вид и толк, обратимся к строгим определениям.

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

Геодезическая долгота L – двугранный угол между плоскостями геодезического меридиана данной точки и начального геодезического (гринвичского) меридиана. Долготы точек, расположенных к востоку от начального меридиана, называются восточными, а к западу – западными, и отсчитываются они от 0 до 180 градусов.

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

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

Следует подчеркнуть, что отвесная линия и нормаль не совпадают между собой, и это различие, которое в среднем со-

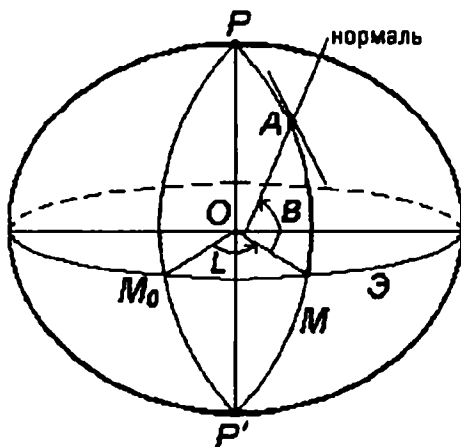


Рис. 3. Геодезические координаты

ставляет 3–4 секунды, в геодезии называют *уклонением отвеса*. В практике выполнения обычных геодезических работ это различие не учитывается, в связи с чем пользуются географическими координатами, которые представляют собой обобщение астрономических и геодезических координат при условии $B=\varphi$, а $L=\lambda$, т.е. когда отклонение отвесной линии от нормали не учитывается. Внимательный читатель, очевидно, заметил, что выше при определении географической системы координат в качестве основного параметра использован радиус, проведенный из центра Земли к данной точке. Чтобы окончательно поставить точку в этом вопросе и избежать неминуемых кривотолков, замечу, что на практике радиус, определяющий направление к центру Земли, заменяется отвесной линией. А вообще, не имея ни малейшего желания усложнять вашу, и так не простую жизнь, уважаемые коллеги, скажу вам по секрету, можете смело использовать географические координаты, когда форма Земли принимается за шар. Теперь, и в самом деле, можно поставить точку и попытаться перейти от рассмотренных сферических координат к прямоугольным.

Мне кажется, что у моего читателя возникла туманная «абракадабра» координатных систем, изложенных выше. И поэтому, желая облегчить текущее функционирование моего подопечного в геодезическом пространстве, куда я его затянул, предлагаю вспомнить систему координат на плоскости, известную ему из школьных курсов алгебры и геометрии. Эту

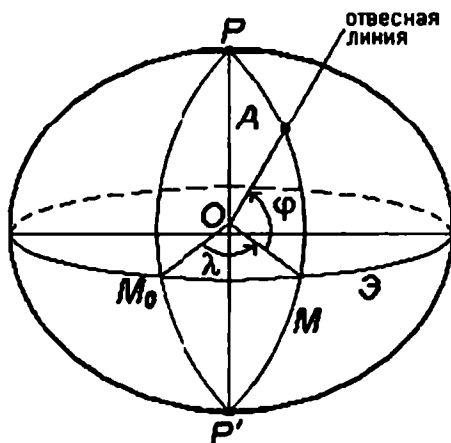


Рис. 4. Астрономические координаты

систему мы называем *прямоугольной*, она знакома нам под именем *декартовых координат*, названных в честь своего создателя. Здесь всё более чем просто. Система плоских прямоугольных координат определяется двумя взаимно перпендикулярными прямыми линиями, которые называются осями координат (ось абсцисс – OX и ось ординат – OY). Точка их пересечения O называется началом координат (рис. 5).

Система делится на четыре четверти (квадранта), в зависимости от которых координаты могут принимать положительные и отрицательные значения.

Внимательный читатель, безусловно, обратил внимание, что оси OX и OY находятся не на своих местах, по крайней мере, по сравнению с тем, что он изучал по математике. Конечно же, он не ошибся, но и я, признаться, не допустил ляпсуса, да и типография тут ни при чём. Действительно, положение координатных осей в геодезии взаимно заменено. Причина перестановки осей в подавляющем большинстве учебников не указывается. На наш взгляд, она заключается в том, что ось абсцисс OX (условно принятая за начальную или исходную) совмещена в геодезии с северным направлением меридиана. А именно от него по часовой стрелке отсчитываются (как мы выясним чуть позже) все ориентирующие углы (поэтому и оцифровка четвертей, как вы заметили на рис. 5, тоже изменена по сравнению с математикой).

А теперь давайте думать. Для какой такой святой цели мы так напрягались, изучая астрономическую, геодезическую и

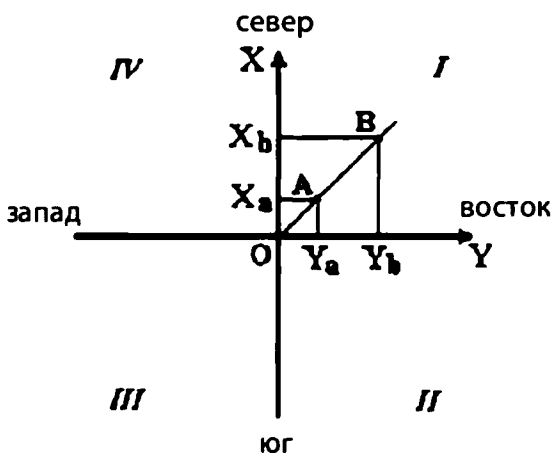


Рис. 5. Прямоугольная система координат

географическую системы координат. Неужели только для того, чтобы, в конечном итоге, перейти к простой и плоской системе координат. Представьте себе, что именно так. Ведь вы не забыли, что конечным продуктом геодезических измерений является карта. А карта есть не что иное, как участок земной поверхности, изображённый, как правило, на листе бумаги, который совсем не похож на геоид, эллипсоид или шар, а является плоскостью. Измерения же, как мы установили ранее, всё-таки проводились на эллипсоиде или на шаре. И как бы мы ни противились этому, жизнь заставляет нас найти способ перехода с поверхности этого эллипсоида или шара на плоскость или, другими словами, на создаваемую карту.

Если немного упростить задачу, то нам предстоит перейти от глобуса к бумажной карте. Но даже и при таком упрощении сделать это достаточно сложно. В самом деле, попробуйте развернуть арбуз так, чтобы он уложился на столе всей своей поверхностью. Разумеется, арбуз треснет и лопнет, не оставляя нам никаких шансов уложить его на плоскости стола без разрывов. Как решить эту проблему думали картографы и математики ещё в средние века. На сегодняшний день для осуществления перехода от сферической поверхности к плоскости науке не известны никакие другие способы, кроме единственного, который мы называем методом проекций. Под проекцией мы будем понимать математический способ изображения сферической поверхности Земли на плоскости, т.е. на карте. К нашему взаимному неудовольствию, уважаемые коллеги, выяснилось, что насчитывается более сотни разновидностей картографических проекций. А ещё к большому огорчению нашему следует помнить, что любая картографическая проекция вносит искажения в геометрию той фигуры, которую она, собственно говоря, призвана спроектировать со сферы на плоскость. Идеальных проекций в природе просто не существует. Любая из них может исказить и углы, и площади, и расстояния. Выбор картографической проекции для данной страны, в конечном итоге, определяется задачей - свести искажения при переходе с земной поверхности (эллипсоида) на плоскость (карту) к такому максимально возможному минимуму, при котором эти искажения практически не ощутимы.

В качестве примера приведём конформную поперечно-цилиндрическую проекцию Гаусса-Крюгера. Следует отметить, что именно эту проекцию, разработанную немецкими матема-

тиками на рубеже XVIII и XIX веков, успешно применяют на такой обширной территории как Россия, получая при этом относительно небольшие искажения. Теперь для полной ясности расшифруем каждое из слов, определяющих саму проекцию. Непонятное слово конформная заменим синонимом равноугольная, которое означает, что углы между линиями на эллипсоиде в этой проекции соответствуют своим изображениям на плоскости, т.е. практически не искажаются. Чуть сложнее со словосочетанием поперечно-цилиндрическая.

Немного собственной фантазии и станет понятным: чтобы получить изображение земного эллипсоида на плоскости, необходимо этот эллипсоид вписать в цилиндр так, чтобы один из меридианов оказался на боковой поверхности взятого цилиндра, а плоскость экватора совместилась с осью цилиндра (рис. 6). При этом каждая, даже совсем небольшая фигура на эллипсоиде сохраняет свою форму на плоскости, куда она перенесена. Именно этим действием и достигается, подчеркнутое ранее, равенство углов на эллипсоиде (на местности) и на плоскости (на карте). После этих нехитрых манипуляций попробуем развернуть цилиндр так, чтобы он касался земных полюсов P и P' . Как видно из рис. 6, на полученном изображении только меридиан касания и экватор представляются пря-

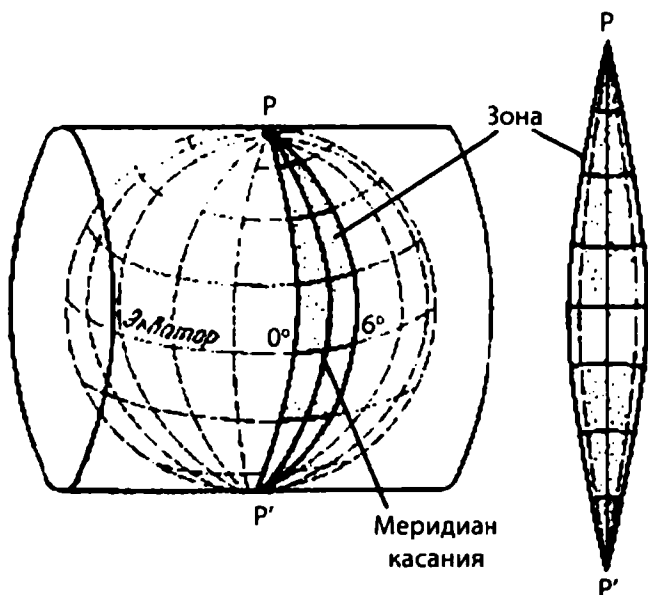


Рис. 6. Поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса-Крюгера

мыми линиями, а остальные меридианы и параллели воспроизводятся кривыми очертаниями и выглядят как лепестки (рис. 7). Эти, так называемые лепестки, называются зонами, всего их 60. Если вспомнить, что экваторная окружность насчитывает 360 градусов, то нетрудно понять, что протяжённость каждой такой зоны на экваторе составляет шесть градусов. Счёт их ведётся от гринвичского меридиана.

Но что же с плоской прямоугольной системой координат? Ведь именно она наиболее приспособлена для целей составления карт. Но сначала вопрос: можно ли распространить этот вышеприведенный способ перехода от сферы к плоскости на большие территории, когда результаты измерений, выполненных в разных частях какого-то региона, надо связать в единое целое? Сможем ли мы получить желаемое в единой системе без искажений? И если мои виртуальные оппоненты скажут, нет: они будут тысячи раз правы. Чтобы, наконец, ответить на мои вопросы утвердительно, для каждой зоны создаётся своя *зональная система плоских прямоугольных координат* (рис. 8).

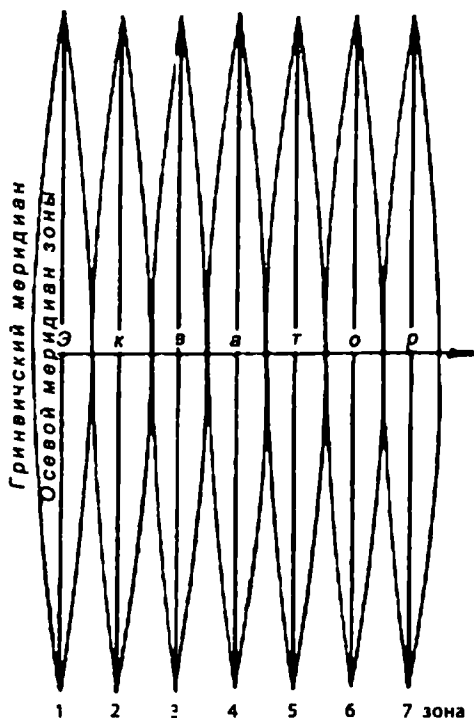


Рис. 7. Шестиградусные зоны

Средний меридиан зоны называется осевым, он совпадает с направлением оси абсцисс XX , а линия экватора является осью ординат YY . Северное направление оси абсцисс и восточное оси ординат принято считать положительными, а южное направление оси абсцисс и западное ординат – отрицательными. Из рис. 8 видно, что координатная сетка в каждой зоне образуется линиями, которые параллельны осям XX и YY , а положение точки фиксируется абсциссой x , отсчитываемой от экватора, и ординатой y , равной расстоянию от осевого меридиана. Понятно, что для государств, расположенных в северном полушарии, абсциссы точек будут положительными. А вот ординаты, как видно из рис. 8, могут изменяться и принимать отрицательные значения. В геодезии не принято обозначать координаты знаком минус, это неудобно при вычислениях, да и, прямо скажем, дискомфортно. По этой причине начало отсчёта ординат смещено на 500 км к западу. Почему именно на 500 км? И этому есть разумное объяснение. Да потому что 500 км круглое число, и оно больше, чем 333 км. А почему, собственно, 333 км? Ответ более чем простой. Длина

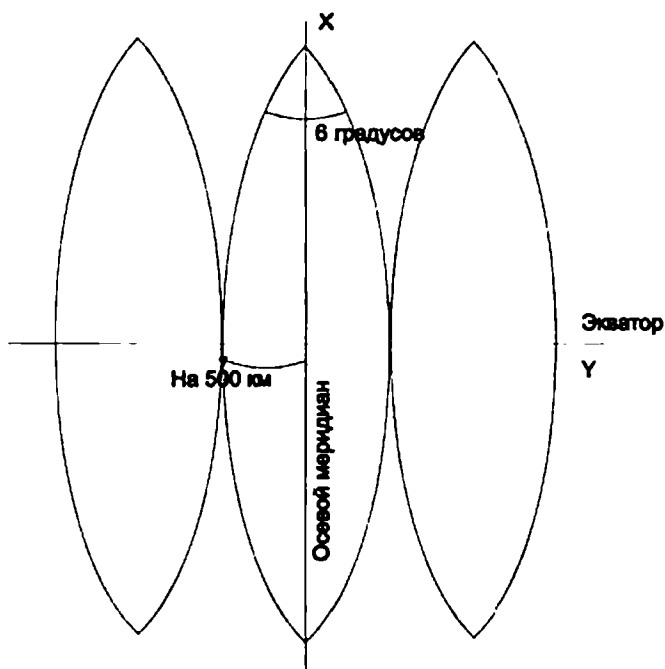


Рис. 8. Зональная система прямоугольных координат

экваториального градуса составляет примерно 111 км, а зона у нас, как вытекает из предыдущего объяснения, шестиградусная. Таким образом, длина зоны по экватору получилась 666 км. Осевой меридиан зоны делит её на две равные части: отсюда и получились 333 км. Таким образом, ординаты, расположенные как к западу, так и к востоку от осевого меридиана приобретают только положительные значения. Вот, пожалуй, и всё о проекции Гаусса-Крюгера, в частности, и о проекциях вообще. Примем только к сведению, что во многих странах для составления топографических карт применяют универсальную поперечно-цилиндрическую проекцию Меркатора, которая близка по своим свойствам и распределению искажений к вышеописанной проекции Гаусса-Крюгера.

В заключение вопроса о проекциях необходимо продемонстрировать ещё одну систему, которая называется полярной. *Плоская полярная система координат* чрезвычайно важна при изготовлении топографических карт, так как параметрами этой системы являются угол и линия, которые, собственно, и измеряются на местности.

Итак, вместо прямоугольных координат x и y мы вводим *полярные координаты* β и S (рис. 9), где β - угол, отсчитываемый от полярной оси АВ до направления на данную (измеряемую) точку Р, S - расстояние от полюса А до точки Р. Полярные координаты β и S однозначно определяют положение точки Р на плоскости относительно начала координат (полюса) точки А.

Следующим геодезическим аксессуаром является понятие **ориентирование направлений** или, лучше сказать, **ориентирование линий**. Предположим, что мы находимся в известной точке А и нам необходимо добраться до неизвестной точки В. Несмотря на то, что расстояние между точками задано, задача отыскания местоположения точки В практически неразрешима. Действительно, существует множество вариантов, в каком направлении от исходной точки А будет находиться искомая точка В. Для однозначного решения этой несложной задачи не хватает всего лишь одного параметра, некоего *ориентирующего угла*, с помощью которого легко найти единственно правильное местоположение точки В. Исходя из этого, ориентированием мы будем называть определение местоположения точки на местности с помощью, неизвестного пока, ориентирующего угла. Ключевым в этом предложении равно, как и во всём этом разделе, выступает слово ориентирующий. Что оно обозначает? Англий-

ский глагол *orient* обозначает ориентироваться, а английское существительное *orient* переводится как восток. Складывается впечатление, что когда-то древние люди каким-то образом связывали ориентирование с востоком, стороной горизонта, где восходит солнце. Мы же, в поисках своего места под солнцем, будем опираться на несколько другую концепцию: установленные нами чуть позже ориентирующие углы мы привяжем не к востоку, а к северу. По той веской причине, что все меридианы нашей сферической планеты равно, как и магнитная стрелка компаса, направлены не к востоку, а в северном направлении. Вот, пожалуй, и вся концепция. Всё остальное – это дело техники, которой мы немедленно и займёмся.

Прежде всего, договоримся, что ориентировать линию – это значит определить её направление относительно исходного направления с помощью упомянутого ориентирующего угла, который мы назовём *азимутом линии*. Разберёмся вначале с направлением, которое мы определили словом исходным. Под этим *исходным направлением* мы будем подразумевать направление меридиана. Чтобы, коллеги, не вводить вас в заблуждение и не усложнять простые вещи, «зарубите» себе на носу и запомните раз и навсегда – таких меридианов всего три: *магнитный, истинный и осевой*, и отсчитывать азимуты мы будем именно от этих меридианов. Азимуты эти будут соответственно называться *магнитными, истинными или картографическими* (ди-

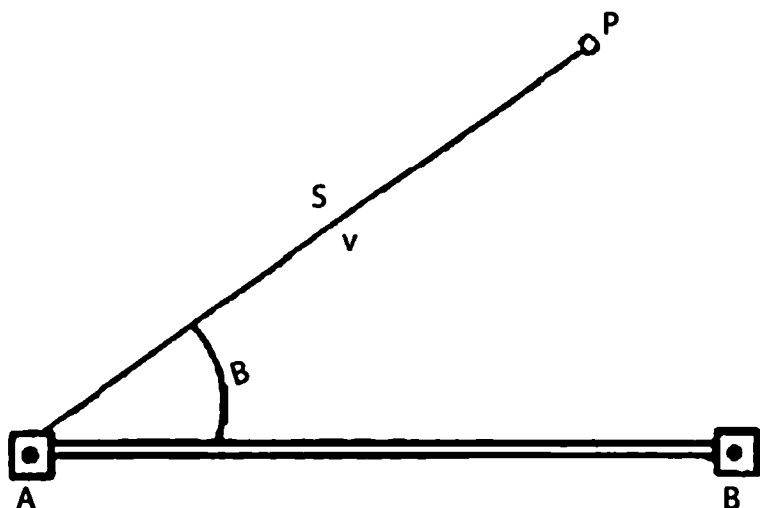


Рис. 9. Плоская полярная система координат

рекционными углами). Чтобы не усложнять приведенную терминологию, считаю своим долгом привести небольшой комментарий относительно понятий истинный меридиан и истинный азимут. В разных учебниках, применительно к меридиану и азимуту, под словом истинный подразумевают астрономический или геодезический. Чтобы не вносить разночтение одного и того же слова, договоримся, что мы обобщим эти слова, не таким уж искажённым, синонимом географический (меридиан или азимут). А теперь, друзья, к барьеру. Иначе говоря, к формулировке: *угол, измеряемый по ходу часовой стрелки от северного направления меридиана до заданного направления (от 0 до 360 градусов), называется **азимутом*** (рис. 10), к которому, повторяю, в зависимости от названия меридиана, приклеиваются прилагательные географический A , магнитный A_m или картографический α . Название картографический азимут придумано мною взамен общеупотребительного в геодезической литературе термина дирекционный угол. На мой взгляд, понятие картографический азимут более удобно для понимания того, что приведенный азимут отсчитывается от осевого меридиана соответствующей зоны, который параллелен вертикальным линиям (осям абсцисс) сетки прямоугольных координат, помещённой на топографических картах.

Уважаемые коллеги, пожалуйста, не расслабляйтесь, мы

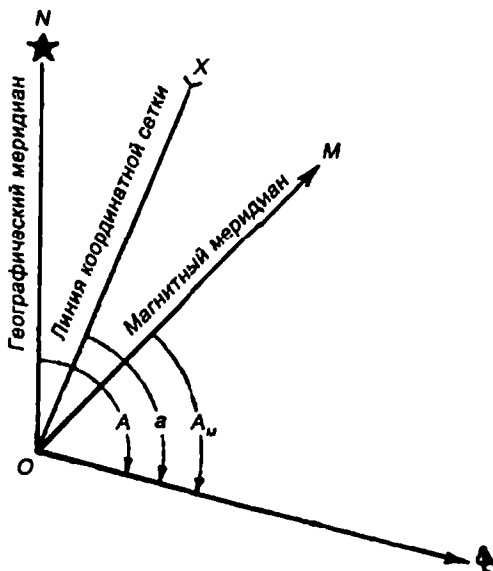


Рис. 10. Азимуты линий

продолжаем наше путешествие в азимутальном мире, в который вы забрели по нашему обоюдному желанию и волеизъявлению. Очень надеюсь, что я не предоставил вам ни малейшей возможности заблудиться в этих азимутальных дебрях. Поэтому пришло время выяснить существует ли какая-то функциональная связь между азимутом географическим, азимутом магнитным и азимутом картографическим. Разумеется, не надо быть пророком, чтобы ответить: конечно же, да. Так давайте немедленно установим эти взаимосвязи.

Прежде всего, довожу до вашего сведения, что географический меридиан, проходящий через земные полюса, не совпадает с магнитным меридианом, который, по сути дела, проходит через свои магнитные полюса. Совсем не лишне напомнить, что направление установившейся магнитной стрелки компаса. вообще говоря, соответствует направлению магнитного меридиана в точке, в которой вы находитесь. И ещё хочу сказать вам, друзья, и даже, с вашего позволения, акцентировать, что угол между географическим меридианом данной точки и её магнитным меридианом называется **склонением магнитной стрелки δ** . Это магнитное склонение считается положительным (рис. 11), если магнитный меридиан отклонён к востоку от географического, и отрицательным, если он отклонён к западу.

И, таким образом, зависимость между географическим (гео-

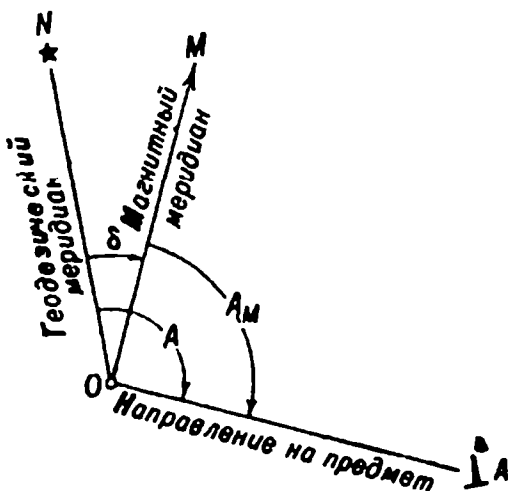


Рис. 11. Склонение магнитной стрелки

дезическим) и магнитным азимутом отобразится простой формулой

$$\delta = A - A_m, \quad (2)$$

где δ – склонение магнитной стрелки (угол, на который отклоняется свободно подвешенная магнитная стрелка от географического меридиана).

Ещё раз напомним, что магнитные полюса Земли не совпадают с географическими, например, северный магнитный полюс находится на северо-западе Канады. Больше того, полагаю, моему читателю небезынтересно узнать, что положение магнитных полюсов изменяется с течением времени. С учётом этих изменений, различают *вековые, годовые и суточные* изменения магнитной стрелки. Не вдаваясь в подробности магнитометрии, отметим, что вековые изменения за 500 лет могут достигать значительных величин (более 20° С), а суточные в максимуме не превышают 15 минут.

Итак, дорогие коллеги, первый тайм мы уже отыграли, выяснив, как соотносятся между собой географический и магнитный азимуты. Во втором тайме мы займёмся аналогичной работой, отыскивая корреляцию (связь) между географическим и картографическим азимутами.

В правой части рис. 12 мы видим, что между географическим (истинным) и осевым меридианом (которые опять-таки не совпадают) обозначен угол γ , характеризующий это несовпадение. В левой части рис. 12 показан фрагмент топографической карты, где чётко прослеживается, что этот угол выражается разностью географического (истинного) азимута A и картографического азимута α . Осталось только приведенную геометрию проинтерпретировать алгеброй, которая выражается формулой

$$\gamma = A - \alpha. \quad (3)$$

Полученный угол γ в формуле (3) называется **сближением меридианов**. Этот угол, как раз, показывает не столько сближение, сколько, собственно, несближение, т.е. несовпадение географического (истинного) меридиана на геоиде или на эллипсоиде с осевым меридианом (или линии ему параллельной) на

плоскости (карте). По аналогии со склонением магнитной стрелки сближение меридианов может быть *положительным* и *отрицательным*. Значения склонения магнитной стрелки для данного региона и сближения меридианов для данной топографической карты указываются на полях соответствующего листа этой карты.

Ну вот, друзья, отыграли мы и второй тайм. Но, как бывает в реальной жизни, иногда судья назначает, так называемое, дополнительное время. На нашем геодезическом стадионе судьёй является ваш покорный слуга, и, пользуясь наделёнными мне полномочиями, я назначаю это время. Только назову я его, пожалуй, не дополнительным, а, с вашего позволения, основным по веской причине, что мы переходим к рассмотрению задач, которые красной нитью пронизывают всю геодезическую практику. Я не побоюсь назвать эти задачи фундаментальными, поскольку они, с одной стороны, действительно, являются фундаментом для решения многих геодезических задач, а, с другой стороны, в них закодирована главная или даже конечная цель большинства геодезических работ - получение координат измеряемых точек с последующей миссией на их основе создать топографическую карту той мест-

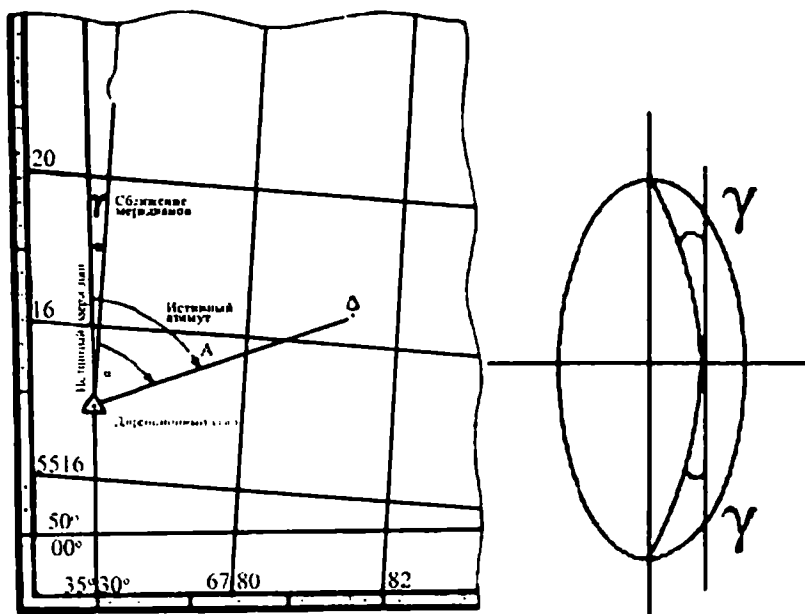


Рис. 12. Сближение меридианов

ности, где находятся эти точки. Мы будем называть эти задачи - прямой и обратной геодезическими задачами.

Итак, друзья, простите за тавтологию, попрошу вас снова к барьеру. Начнём с *прямой геодезической задачи*. Помните, как в школьной теореме, что-то дано, а что-то требуется доказать. Поехали, дано: координаты точки А (X_A, Y_A), расстояние между точками А и В (S_{AB}) и картографический азимут (α), найти: координаты точки В (X_B, Y_B).

А дальше простая геометрия. На рис. 13 чётко просматривается, что

$$X_B = X_A + \Delta X, \quad (4)$$

$$Y_B = Y_A + \Delta Y, \quad (5)$$

где ΔX и ΔY - приращения координат.

Из прямоугольного треугольника ABC следует:

$$\Delta X = S_{AB} \times \cos \alpha_{AB}, \quad (6)$$

$$\Delta Y = S_{AB} \times \sin \alpha_{AB}. \quad (7)$$

Подставляя значения, полученные из выражений (6) и (7), в формулы (4) и (5), получим

$$X_B = X_A + S_{AB} \times \cos \alpha_{AB}, \quad (8)$$

$$Y_B = Y_A + S_{AB} \times \sin \alpha_{AB}. \quad (9)$$

Резюме: хочу заострить ваше внимание и даже, если хоти-

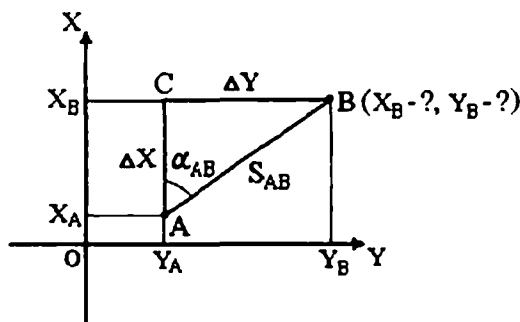


Рис. 13. Прямая геодезическая задача

те, подчеркнуть, что полученные формулы (8) и (9) прямой геодезической задачи позволяют, практически во всех случаях нашей геодезической жизни, получить координаты определяемой точки по известным координатам начальной точки, по заданному расстоянию между этими точками и установленному картографическому азимуту, полученному для этого заданного направления. Остаётся открытым только один вопрос: откуда берутся это расстояние и этот азимут. Относительно расстояния - ответ однозначный: оно измеряется. Как измеряется? Об этом мы поговорим в следующих главах. Чуть сложнее дело обстоит с азимутом. В принципе, его тоже можно измерить. Если проделать это с помощью обычного компаса, то мы получим магнитный азимут с точностью, равной $2-3^\circ$. Сразу оговоримся, что в геодезии такая точность никого не устраивает. А ещё азимут измеряют астрономическими методами. В этом случае мы получаем высокую точность измерения, погрешность которого составляет менее одной секунды. Измерения такого рода требуют много времени и поэтому сопряжены с большими финансовыми затратами. Понятно, что применять астрономические методы при массовых измерениях для картографических целей нецелесообразно. В дальнейшем значения азимута α , входящего в формулы (8) и (9), будем выражать через измеренные горизонтальные углы β .

А теперь, не переводя дыхания, немедленно перейдём к решению *обратной геодезической задачи*. Вперёд и с песней, дано: координаты точки А (X_A, Y_A) и координаты точки В (X_B, Y_B), найти: расстояние между точками А и В (S_{AB}) и картографический азимут (α_{AB}). Снова вспоминаем евклидову геометрию с элементами элементарной тригонометрии.

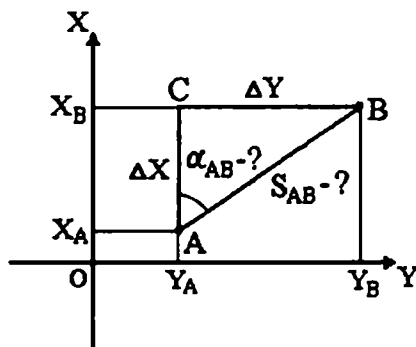


Рис. 14. Обратная геодезическая задача

Из рис. 14 следует, что

$$\tan \alpha = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A}, \quad (10)$$

$$S_{AB} = \frac{Y_B - Y_A}{\sin \alpha_{AB}} = \frac{X_B - X_A}{\cos \alpha_{AB}}. \quad (11)$$

Резюме: картографический азимут α_{AB} определяется по тангенсу угла, вычисленного из частного от деления приращения ординат на приращение абсцисс, а расстояние между точками S_{AB} есть не что иное, как частное от деления приращения ординат на синус азимута или от деления приращения абсцисс на косинус азимута.

Интерпретация: слово интерпретация означает объяснение или толкование. Вот я и хочу растолковать, а ещё лучше, перевести на более понятный язык смысл обратной геодезической задачи. Допустим, не приведи господь, следует запустить ракету из точки А для поражения цели, находящейся в точке В. Разумеется, для этого следует знать координаты этих точек. Используя эти координаты, мы с высокой степенью точности определяем расстояние до цели и азимут направления запуска ракеты из точки А. Современные компьютерные устройства задают вычисленные параметры пусковым установкам, осуществляющим запуск ракеты. Это, конечно, упрощённая схема, однако принцип остаётся неизменным: расчёт траекторий ракет и орбит спутников, решение навигационных задач при проложении курсов кораблей и самолётов производится именно на базе приведенных простых формул (10) и (11).

В заключение этой главы я возвращаю своего читателя из лесных дебрей геодезических аксессуаров, через которые мы с вами сумели пробраться, к отдельному дереву, входящему в этот лес. И я хочу, чтобы, с одной стороны, вы из-за этого дерева обзоредали весь лес, а с другой стороны, понимали, что скрывается за этим деревом. Под деревом, в иносказательном, разумеется, смысле, я подразумеваю топографическую карту, на создание которой, в конечном итоге, нацелена геодезия и направлено всё, что мы с вами успели изучить. И вот сейчас, коллеги, я хочу застолбить ещё один аксессуар, ещё один элемент, без которого составление карты становится

ся практически невозможным. Этот аксессуар называется **горизонтальной проекцией** или **горизонтальным проложением**. Итак, засучиваем рукава и вникаем в суть этого несложного, но архиважного понятия, без которого невозможен перевод полевых измерений в картографическое изображение.

Смотрим на рис. 15, в верхней части которого изображены точки А и В, расположенные на земной поверхности. Между этими точками на местности измерено расстояние $AB = D$. В нижней части того же рис. 15 мы видим плоскость Р, которая есть не что иное, как карта. На этой карте измеренная на местности линия АВ представится отрезком $ab = S$, который является проекцией линии АВ. Эту проекцию мы и будем называть горизонтальным проложением. Разберёмся, для полной ясности, как мы получили эту проекцию. Да очень просто. Из точек А и В земной поверхности на плоскость Р были проведены отвесные линии (назовём их для простоты перпендикулярами). Отрезок, расположенный между основаниями этих перпендикуляров на плоскости (на карте), в геометрии называют проекцией, а в геодезии - горизонтальным проложением. И в самом деле, совсем не сложно. Чтобы всё-таки немного усложнить отмеченное, справедливости ради, необходимо уточнить, что вышеизложенное справедливо для геодезических работ на небольшой территории, когда часть эллипсоида, который мы принимаем за уровенную поверхность, можно представить как плоскость. В противном случае, когда

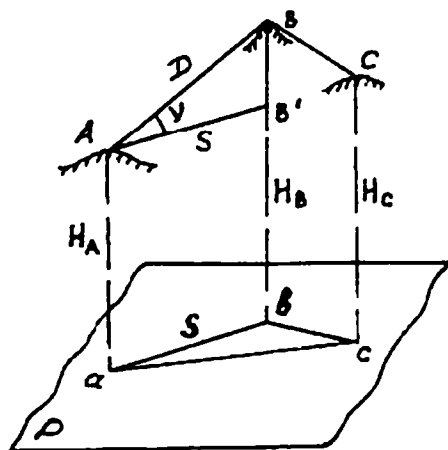


Рис. 15. Горизонтальное проложение

измеряемые участки значительны, необходимо сначала спроектировать все точки этого участка на эллипсоид и только затем изобразить этот участок на плоскости (на карте). Горизонтальное проложение (S) легко находится из простого соотношения

$$S = D \times \cos \gamma, \quad (12)$$

где D - измеренное на местности расстояние; γ - угол наклона. И я очень надеюсь, коллеги, что как из здравого смысла, так и из формулы (12) следует, что во всех случаях (кроме случая, когда $\gamma = 0$) расстояния на карте будут всегда меньше соответствующих им расстояний на местности.

Интерпретация: вы планируете построить забор вокруг вашего дачного участка, который расположен на холме, имеющем значительный уклон к плоскости горизонта. Участок нанесён на топографическую карту. Необходимо точно знать, сколько проволоки или дерева для этого потребуется. Что надо сделать, чтобы реализовать эту задачу? Прежде всего вооружиться обыкновенной линейкой и измерить на карте все стороны этого участка. Далее, пользуясь масштабом карты (о картах и их масштабах мы поговорим в следующей главе), определить длины сторон нашего участка на местности. Но будут ли измеренные по карте расстояния соответствовать реальным расстояниям на местности? Конечно же, нет. По измерениям на карте мы получили, опять таки, проекции реальных линий местности, т.е. их горизонтальные проложения. Чтобы вычислить реальные наклонные расстояния на местности D (рис. 15), воспользуемся выражением, полученным из формулы (12)

$$D = \frac{s}{\cos \gamma}, \quad (13)$$

где γ - угол наклона, измеренный на местности. И только после вычисления по (13) всех сторон участка вы определяете его истинный периметр и по полученному метражу смело бежите в магазин для покупки материала для вашего забора.

ГЛАВА 3

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ

**Что такое топография,
топографические карты,
масштабы карт и их точность,
условные знаки, изображение
рельефа, нахождение высот
на картах, построение профиля
местности, определение
координат и углов
ориентирования по карте**

*В каждой карте есть метафоры,
В каждой карте биография.
Перед вами индикаторы,
Что зовутся топографией.*

Мы начинаем изучение этой главы с понятия **топография**. Сначала немного лингвистики. Слово топография происходит от греческих слов *topos* - место и *grapho* - пишу. И, таким образом, как трактует толковый словарь Д. Н. Ушакова, топография - это раздел геодезии, посвящённый измерению земной поверхности для изображения на планах и картах. Выражаясь высоким слогом, можно сказать, что топография является спутником геодезии. В том, что касается технологии, топография, действительно, занимается географическим и геометрическим изучением местности путём создания топографических карт. В сферу топографии входят вопросы классификации, содержания и точности топографических карт, методики их создания и получения по ним различной информации о местности.

Сосредоточимся сейчас на термине карта. Надо признать, что у карт довольно разветвлённая классификация. И она различается по следующим признакам: по масштабу (крупномасштабные и мелкомасштабные), по содержанию (физические, экономические, политические, климатические и т.д.), по охвату территории (карты материков и частей света, регионов мира, отдельных стран и частей стран) и по назначению (справочные, навигационные, дорожные, кадастровые и т.д.). Из всего этого многообразия рассмотрим только **карты топографические**. Поэтому в начале главы уделено место для раскрытия термина топография именно для того, чтобы связать существительное карта с прилагательным топографическая.

По хорошему, наступило время дать определение топографической карте. Скажу вам откровенно, что просмотрев много литературы и "перелопатив" весь интернет, я так и не отыскал точного определения топографической карты. Во всех источниках объясняется, что карта представляет уменьшенное и искажённое по определённым математическим законам изображение на плоскости поверхности Земли. И кто скажет, что это не так? Это, действительно, чёткое и правильное определение, но оно, безусловно, относится к любому виду географической карты. А что же со словосочетанием топографическая карта? Чтобы раскрыть его, добавим к вышеприведённому определению, что топографическая карта - это основной и очень подробный источник графических данных о местности, это документ, который содержит в себе точное и наглядное изображение рельефа, природных и искусственных объектов, расположенных на территории.

И ещё одна деталь, опустить которую не представляется возможным. Практически во всех учебниках термин карта рассматривается совместно с термином план. Причём **топографический план** определяется как уменьшенное и подобное изображение на плоскости поверхности Земли (имеется в виду, по-видимому, небольших участков земной поверхности). Значит, надо полагать, что *карта* - это **уменьшенное и искажённое изображение обширных частей земной поверхности**, а *план* - это **уменьшенное и подобное изображение небольших участков земной поверхности**. С нашей точки зрения, проектирование даже малой части сферической поверхности на плоскость сопряжено, пусть с меньшими, но всё же искажениями. Поэтому не будем разделять графическое изображение Земли на два

понятия: план и карта, а будем говорить только об одном: о карте. Да и в конце-концов, это вопрос не столько принципа, сколько терминологии.

Мой читатель вправе спросить меня, к чему такая многословная риторика по поводу не столь уж сложного понятия, каковым является карта. Да потому, что именно карта – это тот продукт, который является венцом и целью производимых геодезических работ. И прежде чем научиться его производить, следует подробнее познакомиться с самим продуктом, т.е. с картой. Понятно, коллеги? Если да, то поехали дальше!

Если в заголовке предыдущей главы стояло хитроумное слово акссесуары, то в название настоящей главы вставлено премудрое слово индикаторы. В принципе индикаторы – это такие зеленоватые лампочки на электронных приборах, привлекающие наше внимание световым сигналом. Ещё под словом индикатор понимается показатель, а ещё лучше, указатель, посредством которого мы получаем какую-то информацию. И совсем не зря, в нашем случае я приклеил к слову индикаторы слово топографические. Потому что именно в топографическом ракурсе мы будем рассматривать индикаторы, которые помогут нам добыть различную информацию из топографической карты.

Одним из главных таких индикаторов является понятие **масштаб топографической карты**. Несмотря на то, что это понятие знакомо из школьных уроков по географии, всё-таки приведём его определение в трактовке различных толковых словарей, википедий и большинства интернетовских сайтов. Оно выглядит так: масштаб называется отношение длины отрезка на карте к его действительной длине на местности. Простая и довольно ясная формулировка. Но правильна ли она? Безусловно, да, но правильна лишь эскизно, т.е. приближённо. А строго говоря, безусловно, нет. Для нас с вами, дорогие коллеги, вооружёнными пониманием процесса перехода от сферы (эллипсоида), где собственно и производились измерения для данной карты, на плоскость, которой, по существу, и является эта самая карта, более правильной будет отредактированная версия предыдущего определения. И выглядеть она будет так: под масштабом карты понимается отношение длины отрезка на карте к длине горизонтального проложения этого же отрезка на местности. Улавливаете разницу? А разница в том, что длина линии на местности в общем случае

(это в самом буквальном смысле подчеркнуто в предыдущей главе) всегда будет больше, чем на карте. И чтобы карта отражала реальную действительность, масштаб карты должен соотносить соразмерные, т.е. одинаковые величины как на местности, так и на карте.

Масштаб чаще всего выражается простой дробью, в числителе которой стоит единица, а в знаменателе число, показывающее, во сколько раз горизонтальное проложение линии на местности уменьшено при нанесении на карту, т.е.

$$\frac{1}{M} = \frac{1}{d + d_k}, \quad (14)$$

где M - знаменатель масштаба; d - длина горизонтального проложения линии на местности; d_k - длина изображения этой линии на карте.

Масштаб, определяемый формулой (14), в отличие от масштабов линейных и поперечных (которые мы здесь рассматривать не будем), называется *численным* (рис. 16). Раскодируем величины, входящие в формулу (14). Если, например, $d = 1$

км (100 000 см), а $d_k = 4$ см, то $M = 25\,000$ и $\frac{1}{M} = \frac{1}{25000}$. Полу-

ченное выражение на картах принято записывать в следующем виде: 1 : 25 000, т.е. одному сантиметру на карте соответствует 25000 см или 250 м на местности. А теперь приведу mnemonicическое (легкозапоминаемое) правило. Оно не для тех, кто, не дай бог, не умеет думать, а исключительно для тех, кому некогда думать. Суть его в следующем: чтобы узнать сколько реальных метров местности заложено в одном сантиметре карты, следует в знаменателе численного масштаба автоматически отбросить два нуля. И ещё один момент, если мы уже соприкоснулись с масштабами карт. Карты, как известно, бывают *мелкомасштабные* (1 : 1 000 000, в 1 см - 10 км) и *крупномасштабные* (1 : 1000, в 1 см - 10 м). При сравнении двух дробей большей, понятно, считается дробь, у которой знаменатель меньше. Именно поэтому масштаб 1 : 1000 крупнее масштаба 1 : 1 000 000, именно поэтому в первом случае один и тот же объект отобразится более крупно.

Введём крайне важное и обязательное для пользователя картой понятие *точность масштаба*. Это понятие, прежде всего,

связано с несовершенством нашего зрения, возможности которого отнюдь не безграничны. Глаз человека едва различает на бумаге точки, расположенные на расстоянии 0,1 мм друг от друга, собственно, это и есть предельная точность, с которой линии могут быть нанесены на карту. На самом деле, из-за влияния различных ошибок, графическая точность изображения отрезков значительно ниже и может достигать 0,5 мм. Тем не менее, в учебной геодезической литературе точность определения расстояний на карте характеризуется принятой из исследований средней величиной, равной 0,2 мм. Следовательно, горизонтальный отрезок на местности, соответствующий 0,2 мм на карте, будем называть точностью масштаба. Чтобы было совсем понятно, проиллюстрируем это, может быть, не совсем ясное определение. Масштаб карты 1 : 500, 1 см - 5 м, точность 0,2 мм - 10 см. Масштаб карты 1 : 5000, 1 см - 50 м, точность 0,2 мм - 1 м. Масштаб карты 1 : 50000, 1 см - 500 м, точность 0,2 мм - 10 м. Итак, в первом примере, если на местности мы измерили положение двух дорожных знаков, расстояние между которыми составляет 25 см, то они отобразятся на карте масштаба 1 : 500, предельная точность которого - 10 см, и, разумеется, нет никаких шансов вычертить линию, соединяющую эти дорожные знаки на картах масштабов 1 : 5000 и 1 :

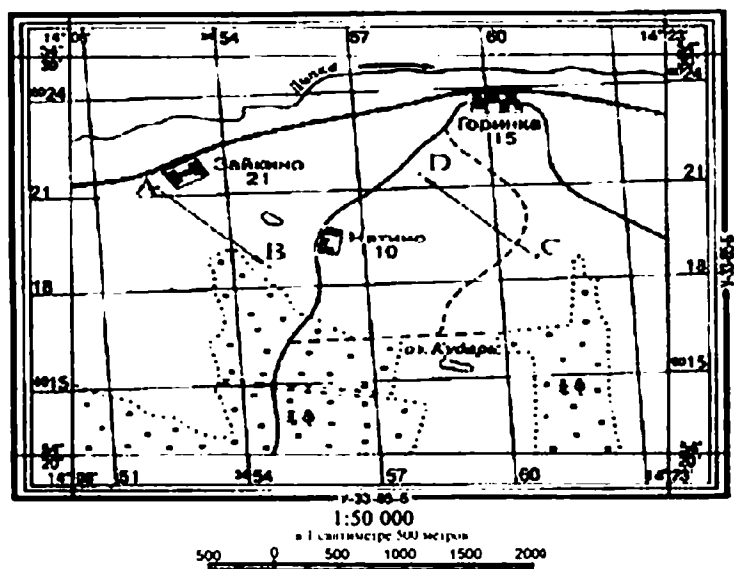


Рис. 16. Масштаб карты

50000. А если во втором примере нам надо на карте масштаба 1 : 5000 изобразить лесную тропинку, ширина которой 80 см, то, хотим мы этого или не хотим, нам придётся произвести карту более крупного масштаба. И, наконец, в третьем случае, если измеренный фасад дома равен 6 м, то вполне понятно, что он не выразится на карте масштаба 1 : 50000, зато его можно спокойно начертить на карте масштаба 1 : 500. Все эти примеры наглядно показывают, что всем пользователям картографической продукции и прежде всего архитекторам, проектировщикам, землеустроителям перед заказом топографических карт определённого масштаба следует внимательно просчитать точность масштаба карт в соответствии с требованиями, которые они к ним предъявляют. Ведь может оказаться, что заказанный масштаб мельче необходимого, и прочертить на карте запроектированную сеть канализации не предоставится возможным. Может также получиться, что "стреляли из пушек по воробьям", т.е. заказали карту крупного масштаба, чтобы показать на ней колхозное поле, на котором, кроме выращиваемой пшеницы, нет никаких элементов ситуации. При этом следует принять во внимание, что чем крупнее масштаб карт, тем больше времени, а значит и финансовых средств, потребуется на её изготовление. А деньги, друзья, необходимо считать как свои, так и государственные. И для этого совсем не лишне понимать, что такое точность масштаба карты.

Следующим топографическим индикатором являются **условные знаки**, которыми испещрены все топографические карты. Без них карта являлась бы просто ориентированным листом бумаги, из которой немислимо было получить достоверную информацию об окружающей местности. Именно условными знаками, можно сказать, условно изображается всё многообразие ситуации, существующей на земной поверхности. Условных знаков много, их число, пожалуй, переваливает за сотню и, опять-таки условно, их можно разделить на три группы (рис. 17): масштабные (контурные или площадные), внемасштабные и пояснительные.

Масштабные условные знаки изображают объекты местности в подобной форме, разумеется, с учётом масштаба карты. По ним можно определить размеры этих объектов. Указанные знаки всегда имеют внешний контур, поэтому их и называют контурными. Контур может изображаться сплошной линией разного цвета. Черным, например, для зданий и сооружений,

оград и заборов; голубым - для озёр и водохранилищ; коричневым - для склонов и обрывов. Контур также может вычерчиваться точечным пунктиром, как, например, сельскохозяйственные и естественные угодья.

Внемасштабные условные знаки изображают объекты, которые по своей малости не отражаются на карте данного масштаба, но имеют информационную важность. К ним относят геодезические знаки, колодцы, родники, километровые указатели и т.п. К внемасштабному условному знаку можно отнести и крупный населённый пункт, который на карте мелкого масштаба, например 1 : 10 000 000, изобразится точкой или квадратом. Примером внемасштабного знака на карте масштаба 1 : 10 000 может служить отдельно стоящее дерево, диаметр ствола которого составляет, предположим, 60 см, в то время как точность приведенного масштаба (напоминаю - 0,2 мм) составляет 2 м. Надеюсь понятно, что отрезок, длина которого меньше 2 м, на карте заданного масштаба ни теоретически, ни практически отобразить нельзя.

Пояснительные условные знаки используются для необходимых комментариев как масштабных, так и внемасштабных знаков. К ним относятся различные подписи, буквенные обозначения и числовые характеристики (высота деревьев, длина моста, характеристика дерева, название населённого пункта и т.д.).

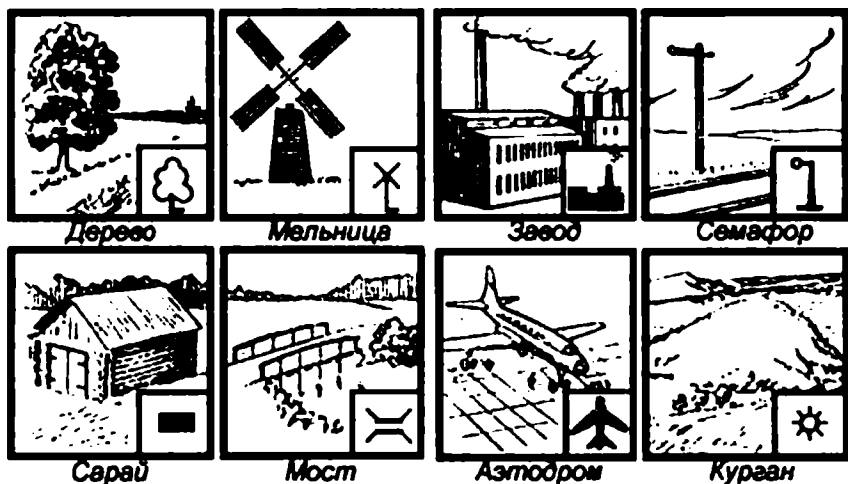


Рис. 17. Условные знаки

Полагаю, уважаемый читатель, что условные знаки не вызвали каких-либо затруднений в понимании, что позволяет легко и непринуждённо перейти к очередному топографическому индикатору. Этот индикатор мы назовём **рельефом**, и посмотрим, как он изображается на топографических картах. Прежде всего, что такое рельеф? В самом общем понимании, это есть совокупность неровностей земной поверхности. Представить себе топографическую карту без изображения этих неровностей просто невозможно. Ваш покорный слуга в своё время занимался спортивным ориентированием. Соревнования по этому увлекательному виду спорта проводились в лесной местности. На карте был изображён только труднопроходимый лес, т.е. условными ситуационными знаками изображать было практически нечего. Искусство отыскания отмеченных на карте и спрятанных на местности пунктов состояло в ориентировании на местности посредством изображённых на карте коричневатых кривых линий (горизонталей), которые изображали различные формы окружающего рельефа.

Вот мы сейчас и поговорим о *горизонтальных* как основном методе изображения рельефа. Предлагаю на минуту закрыть глаза и представить, как это было в предыдущей главе, ярко-зелёный спелый арбуз. Впрочем, цвет и спелость арбуза не имеет значения, в нашем случае более важно, чтобы этот арбуз, для простоты суждений, отобразился в восприятии читателя в форме правильного цилиндра. А теперь, друзья, возьмите длинный и острый нож и разрежьте этот арбуз-цилиндр на равные, предположим через 1 см, кусочки. Что у вас получится в сечении после того, как вы разрежали арбуз? Ну конечно же, замкнутые кривые линии, а точнее, если нож не дрожал в ваших руках от желания побыстрее съесть этот арбуз, у вас получатся концентрические окружности, равноудалённые одна от другой. Причём их количество будет равно количеству надрезов, а высоты точек, принадлежащие к избранной вами окружности, будут одинаковы, если, к примеру, их отсчитывать от плоскости стола, на котором лежит этот замечательный арбуз. На самом деле, наш арбуз как бы висит в воздухе, а искомые высоты, как вы уже знаете, отсчитываются от уровня моря. Всё, друзья, приехали, вот и вся присказка, и никакая сказка впереди вас не ждёт, так как в том, что я рассказал, и заключён принцип изображения рельефа горизонталями на топографических картах. Осталось только ещё раз

подчеркнуть, что горизонтали – это линии, каждая из которых соединяет точки местности с одинаковыми высотами.

В жизни, разумеется, всё сложнее. Окружающий нас рельеф меньше всего похож на цилиндрический арбуз. Мы видим перед собой скалистые горы, изрезанные ущелья, округлые седловины и вытянутые лощины и овраги. Однако принцип изображения неровностей земной поверхности от этого не меняется.

Как видно из рис. 18, в реальности и окружности совсем не концентрические, и расстояния между горизонталями на карте совсем не одинаковы. Это происходит потому, что горы могут быть пологими и остроконечными, долины – крутыми и покатыми, а ещё различают великое разнообразие хребтов, лощин, теснин, плато, котловин, седловин и т.д. Многоликость рельефных форм и порождает различие в их изображении (рис. 19).

Однако всегда надо помнить, что, несмотря на разные расстояния между горизонталями на карте, вертикальное расстояние по отвесной линии между этими горизонталями (между секущими земную поверхность горизонтальными плоскостями)

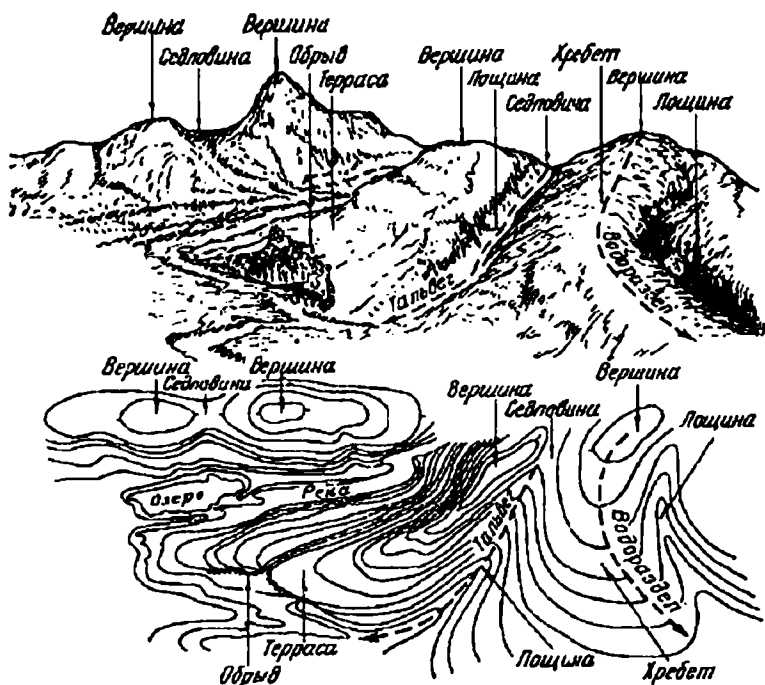


Рис. 18. Формы рельефа

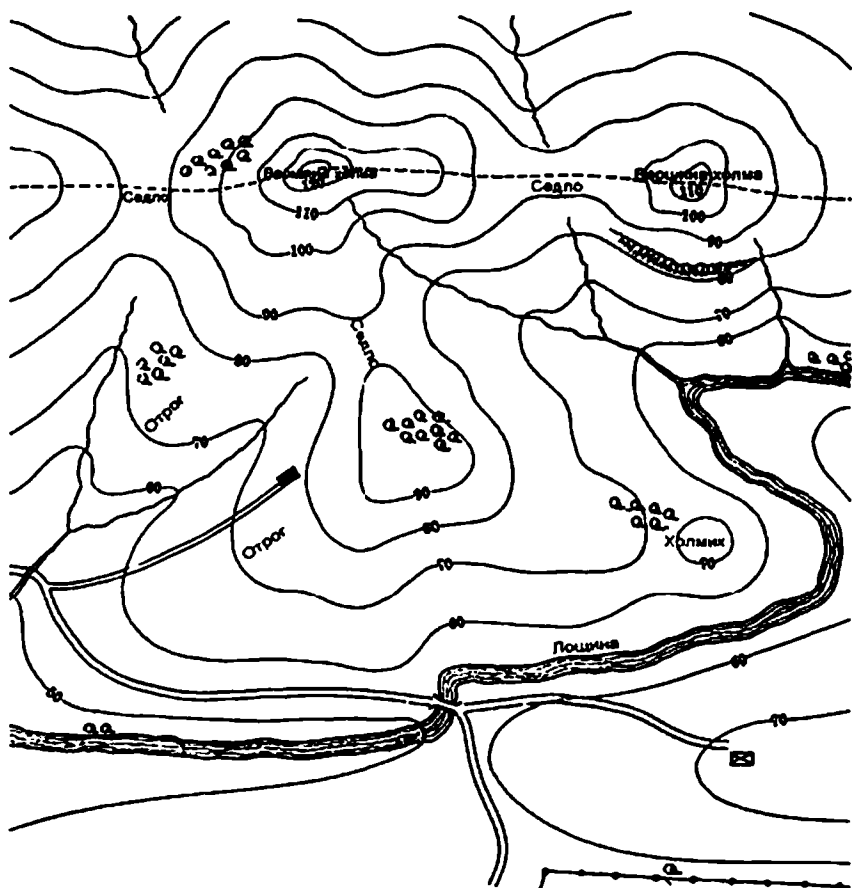
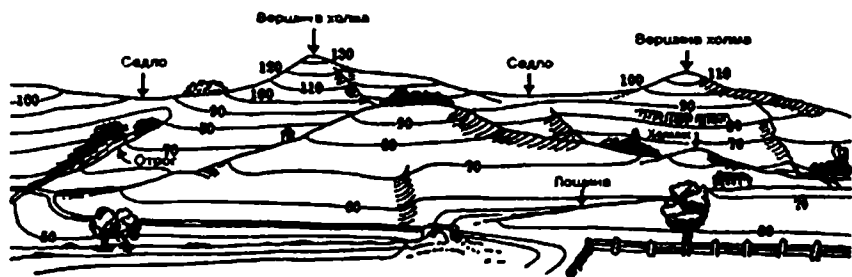


Рис. 19. Изображение основных форм рельефа

ми) будет постоянное в пределах данной карты. Это вертикальное расстояние называется *высотой сечения рельефа*. Эта высота всегда подписывается на карте и соответствует, как правило, одной из стандартных величин 0, 25; 0, 50; 1, 0; 2, 0; 2, 5; 5, 0; 10,0 метров. На рис. 16, например, написано, что сплошные горизонтالي проведены через 10 м, т. е. высота сечения рельефа составляет 10 м. А на рис. 20 высота сечения рельефа горизонталями равна 5 м.

Напоминаю ещё раз, если измерим на карте линейкой расстояния между двумя точками, расположенными на смежных горизонталях, то получим расстояние на местности в данном масштабе между выбранными точками. Высота сечения рельефа, фактически, тоже будет являться расстоянием между данными точками с той лишь существенной разницей, что это уже будет расстояние вертикальное, отражающее реальную высоту между точками местности, расположенными на горизонталях (в нашем случае эта высота равна 5 м). И ещё одно немаловажное замечание: если вы внимательно посмотрите на рис. 18, то непременно заметите на некоторых горизонталях едва приметные, маленькие чёрточки. Их принято называть *бергштрихами*, которые указывают на направление склона местности, другими словами, бергштрихи обозначают направление понижения рельефа местности. Надеюсь, понятно, что гора и котловина изображаются горизонталями практически одинаково, и только по направлению бергштрихов можно определить, какая из этих форм рельефа положительная (гора), а какая отрицательная (котловина).

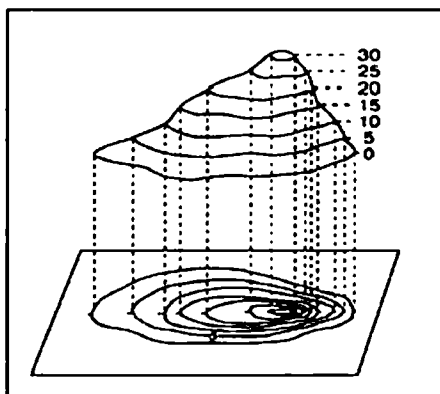


Рис. 20. Высота сечения рельефа

А сейчас решим, что же нам делать с этой высотой сечения рельефа на практике. Если предположить, что точка К находится на горизонтали, высота которой равна 299 м, а высота сечения рельефа для данной карты d составляет 1 м и все последующие горизонталы направлены в сторону повышения рельефа (рис. 21), то нетрудно догадаться, что следующая горизонталь, равно как и точка L, расположенная на ней, будет иметь высоту - 300 м.

На следующем этапе определим высоту точки М, находящейся между горизонталями с высотами в 300 м и 301 м. Для этой цели вооружимся обыкновенной линейкой и измерим на карте расстояние $a=2$ см между горизонталями и расстояние $b=0,5$ см между горизонталью с высотой в 301 м и искомой точкой М. Отрезок a , измеренный на карте, будет соответствовать высоте сечения $d=1$ м, а измеренный отрезок b - неизменной величине x , значение которой найдём из выражения:

$$x = \frac{b}{a}d = \frac{0,5}{2}1 = 0,25 \quad (15)$$

Таким образом, высота точки М будет равна $301 - 0,25 = 300,75$ м. По указанному принципу пропорциональности с помощью высоты сечения рельефа и определяются высоты точек на топографических картах.

Ну что ж, дамы и господа, наш геодезический поезд на всех парах несётся дальше к следующей станции. Эту станцию, где

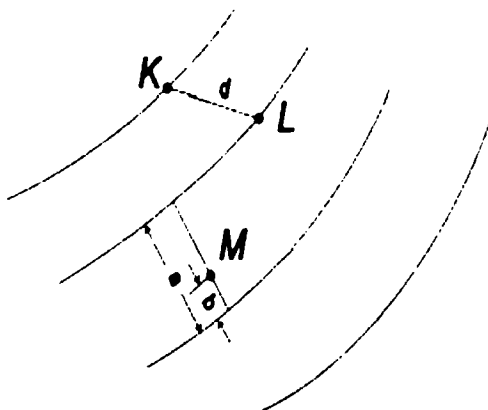


Рис. 21. Определение высоты точки по горизонталям

мы ненадолго остановимся, назовём по имени очередного топографического индикатора - *профилем местности*. Сначала, как всегда, несколько слов о терминологии. Возможно, не все знакомы со словом профиль. В бытовом понимании это, например, черты лица, видимые сбоку, или очертания предмета, которые мы наблюдаем со стороны. В топографии в роли упомянутого лица выступает рельеф, и, когда мы на него смотрим со стороны или сбоку, нам представляется возможность увидеть очертания этого рельефа в виде воображаемого вертикального разреза участка земной поверхности. В общем слова профиль и разрез обозначают одну и ту же линию пересечения какой-либо поверхности (рельеф) с вертикальной плоскостью. Таким образом, профиль в геодезии есть не что иное, как вертикальный разрез земной поверхности. Следующий вопрос, который может возникнуть, а собственно для какой цели нам нужен этот профиль. Профиль, следует подчеркнуть, составляется, прежде всего, для наглядного представления и детальной характеристики рельефа местности, для определения видимости между точками земной поверхности и, главным образом, для решения различных инженерных задач, связанных с проектированием и строительством различных промышленных и гражданских объектов. На рис. 22, б изображён профиль местности, представленной на рис. 22, а. Составить такой профиль довольно несложно. Для этого всего-навсего необходимо на миллиметровой бумаге прочертить горизонтальную линию (уровенную поверхность), на которой в масштабе карты отложить расстояния, соответствующие реальным расстояниям местности АВ, ВС, CD, DE, EF, FG.

С полученных на уровенной поверхности точек восстановить перпендикуляры, на которых уже в так называемом вертикальном масштабе (обычно в 10 раз более крупном, чем горизонтальный масштаб) отложить высоты точек А, В, С, D, E, F, G. Последнее, что нам остаётся сделать, так это соединить найденные

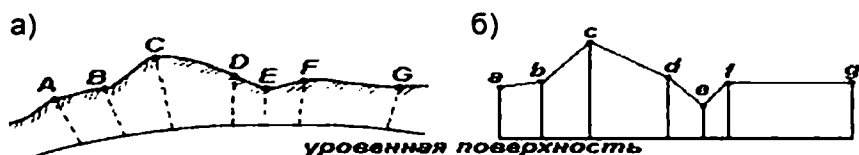


Рис. 22. Профиль местности

точки a, b, c, d, e, f, g прямыми линиями. Полученная ломаная линия, изображающая действительный вертикальный разрез земной поверхности между точками А и G, и будет представлять собой профиль. Необходимо подчеркнуть, что искомые расстояния и высоты точек, которые мы откладывали при составлении профиля, берутся либо из реальных геодезических измерений, либо непосредственно из топографической карты (благо мы уже знаем как с помощью масштаба карты получить расстояние и как по горизонталям определить высоту точки).

Дорогие леди и джентльмены, мы продолжаем работать с картой и поэтому плавно переходим, всё глубже внедряясь в её информационное лоно, к следующему топографическому индикатору, который назовём **определение координат** с помощью упомянутой карты. Упреждая события, связанные с этим определением, сразу оговорюсь, что, держа крепко в руках топографическую карту, у вас появится возможность находить на ней как геодезические (географические), так и прямоугольные координаты отыскиваемых точек.

Принцип нахождения координат по карте более чем простой. На топографической карте имеются две картографические сетки, связанные с двумя системами координат: внешняя сетка (*геодезическая система*) и внутренняя сетка (*прямоугольная зональная система*). Горизонтальные линии первой сетки соответствуют параллелям и обозначают *геодезическую широту*, а вертикальные линии - меридианам и обозначают *геодезическую долготу*. В свою очередь горизонтальные линии второй сетки маркируют оси ординат (y), а вертикальные - оси абсцисс (x). Итак, как говорят сегодня на молодёжном сленге, догоняете? Это я интересуюсь, дорогие коллеги, вы поспеваете за моей мыслью? Если да, то едем дальше. Из рис. 23 понятно, что широта южной рамки внешней сетки составляет $54^{\circ} 40'$, а северной рамки - $55^{\circ} 00'$, и долгота западной рамки - $37^{\circ} 30'$, а восточной - $38^{\circ} 00'$. Чередующиеся светлые и тёмные отрезки на внешней рамке представляют собой линии, длиной в одну минуту ($1'$). Всё, что вам осталось свершить, друзья, так это соединить ближайшие к рассматриваемой точке А вертикальные и горизонтальные линии одноименных минут. Для геодезической широты это будет линия, соответствующая широте $54^{\circ} 58'$, а для геодезической долготы это линия, в точности равная долготе $37^{\circ} 31'$. И последнее, что осталось довести до ума - это промерить линейкой на карте

перпендикуляр ($a = 1$ см) от линии широты ($54^\circ 58'$) до иско-
мой точки А и линию, равную одной минуте ($b = 1,6$ см) на
внешней рамке карты. А дальше из простой пропорции:

$$\frac{b}{a} = \frac{1'}{x} \quad (16).$$

Получаем:

$$x = \frac{a}{b} 1' = \frac{1}{1,6} 1' = 0,6' \quad (17).$$

Таким образом, широта точки А равна $\varphi_A = 54^\circ 58'.6$, а дол-
гота точки А равна $\lambda_A = 37^\circ 31'.0$.

Аналогичным образом определяются прямоугольные коор-

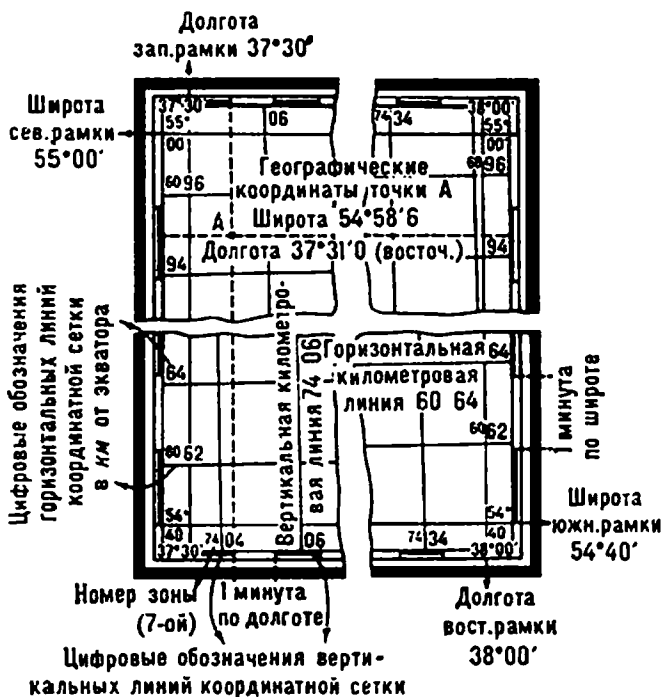


Рис. 23. Определение геодезических и прямоугольных координат по карте

динаты точки А: x_A и y_A . Давайте ещё раз посмотрим на вертикальные и горизонтальные линии, теперь уже внутренней сетки, которую в обиходе называют *километровой сеткой*, так как эти линии проводят через целое число километров. Не забудем ещё раз отметить, что вертикальные линии этой сетки параллельны, как мы изучали ранее, осевому меридиану зоны (оси абсцисс x), а горизонтальные - оси ординат y . В нашем случае, ближайшая горизонтальная линия к точке А составляет 6094 км, что, впрочем, соответствует расстоянию от экватора. Следующая линия километровой сетки подписано числом 6096 км, таким образом, расстояние между этими линиями равно 2 км или 2000 м. Теперь через $a_1 = 1$ см обозначим измеренное по перпендикуляру расстояние на карте от этой линии до точки А, которое соответствует неизвестному числу x . В свою очередь обозначим через $b_1 = 2$ см - измеренное на карте расстояние между линиями километровой сетки, что тождественно 2 км (2000 м). Тогда

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{2000 \text{ м}}{x} \quad (18)$$

и

$$x = 2000 \times \frac{a_1}{b_1} = 2000 \times \frac{1}{2} = 1000 \text{ м} \quad (19)$$

Следовательно, $x_A = 6095000 \text{ м} = 6095 \text{ км}$. Подобным образом находится и ордината точки А (y_A).

Настало время подъехать к конечной остановке этой главы, к последнему топографическому индикатору, который сводится к **определению углов ориентирования** по топографической карте. Под углами ориентирования мы будем подразумевать *картографический азимут* и *геодезический (истинный) азимут*. Упомянутые выше углы ориентирования измеряются на карте с помощью обычного транспортира от северного направления меридиана по ходу часовой стрелки до определяемой линии (это следует из определения азимута, приведенного в предыдущей главе). Осталось только договориться, от какого меридиана мы будем производить измерения. А это уже дело

техники, которая заключается в следующем. Если измеряется азимут картографической сетки, то мы используем зональный осевой меридиан (ось абсцисс x), соответствующий вертикальным линиям километровой сетки, прочерченным на карте. В случае определения геодезического азимута за начало отсчёта мы, разумеется, должны взять истинный (геодезический) меридиан. Здесь, однако, всегда нужно помнить, что линии меридианов на карте отсутствуют, чтобы получить их на карте, следует соединить границы одинаковых минутных интервалов северной и южной рамок карты (рис. 23).

На рис. 24 показана эта несложная технология измерения азимута картографической сетки. Для этого центр транспортира помещают на пересечение вертикальной линии координатной сетки карты с линией, азимут которой мы хотим измерить. И затем от северного направления линии координатной сетки отсчитывают по транспортиру в том месте, где его шкала касается определяемой линии, искомый азимут. В нашем случае отсчёт по транспортиру на определяемой линии равен 94° , а сам азимут этой линии составляет 274° (глядя на рис. 24, а, нетрудно догадаться, что к полученному отсчёту следует прибавить 180°). Азимут картографической сетки линии, проведенной на рис. 24, б, будет составлять 65° .

Принцип измерения на карте геодезических азимутов ни-

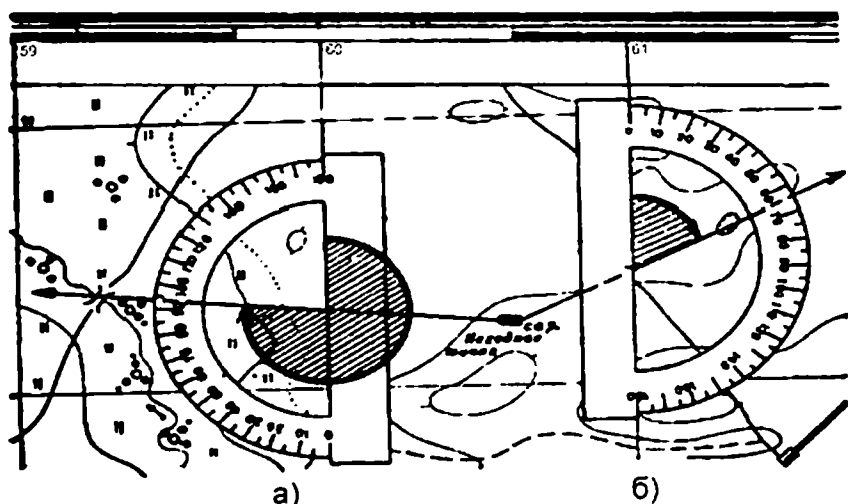


Рис. 24. Нахождение азимута картографической сетки на карте

чем не отличается от приведенного выше, с той лишь разницей (как указывалось ранее), что они измеряются не от осевого, а от геодезического меридиана.

И последнее: следует обратить внимание на то, что измерить магнитные азимуты на топографической карте не представляется возможным. И если совершенно случайно обнаружите на карте местоположение зарытого в лесной чаще драгоценного клада, и если захотите отыскать его на местности, то придётся, уважаемые, измерить на карте геодезические азимуты предполагаемых маршрутных линий. А затем, выбрав помещённое на полях данной карты склонение магнитной стрелки, вычислить по формуле (2) искомые магнитные азимуты (рис. 11). И только теперь, вооружившись компасом, вы, без всякого сомнения, найдёте в лесу вожделенный клад.

ГЛАВА 4 ГЕОДЕЗИОМЕТРИЯ, ИЛИ ЧТО ИЗМЕРЯЮТ В ГЕОДЕЗИИ

Угловые измерения, линейные измерения, точность измерений, геодезические инструменты

*В каждой работе есть вдохновение,
Те, кто черпают его в измерениях,
Смотрят с улыбкой в свой нивелир
На этот прекрасно устроенный мир.*

Итак, уважаемая виртуальная публика, перед нами зелёный свет семафора и наш паровоз снова мчится вперёд по геодезическим шпалам к следующей узловой станции. На предыдущем перегоне мы познакомились с тем, какую информацию можно извлечь из топографической карты, что и как надо сделать, чтобы эту информацию, которую я назвал индикаторами, приспособить к решению различных задач. Теперь же настало время разобраться, каким образом создаётся топографическая карта. Этот трудоёмкий процесс, связанный с тяжёлой, но такой созидательной работой инженеров-геодезистов, можно разделить на три этапа: процесс полевых измерений (под словом поле геодезисты подразумевают не сельскохозяйственную ниву, а местность, где производятся измерения), математическая обработка результатов этих измерений и вычерчивание карты. На этом этапе нам предстоит вторгнуться, в "святая святых" геодезического процесса, в процедуру **измерений**. Если вы, дорогие коллеги, готовы прикоснуться и к этой тайне, то не будем терять время, чтобы продолжить нашу познавательную поездку.

А пока, дорогой читатель, ещё не включился зелёный свет семафора, не сочтите за труд вернуться в начало этой книги и взглянуть на формулу (1), приведенную в первой главе. Взглянули? Вот и прекрасно. Значит, вы вспомнили, что координаты точек, которые наносятся на карту, вычисляются после измерения углов и расстояний на местности.

Начнём с **измерения углов**. Но прежде всего, я хочу посадить вас за школьную парту с тем, чтобы вы воспроизвели в своей памяти, в каких же единицах измеряются углы. Как известно, существуют три такие единицы: градус, град и радиан. **Угломерный градус**, в отличие от градуса алкогольного, равен 1:360 части окружности, он делится на 60 минут, а угловая минута на 60 секунд. **Угломерный град** равен 1:400 части окружности (в этом случае окружность делится не на 360 частей, как общепринято, а на 400). Град делится на сто градовых минут, а градовая минута - на 100 градовых секунд. Сейчас нет смысла вспоминать, что такое **радиан**, т.к. шкалы геодезических приборов откалиброваны или в градусах, или в градах.

В геодезии различают углы горизонтальные и вертикальные. Познакомимся с сущностью их измерения. Начнём с измерения **горизонтального угла** на плоскости обычным транспортиром. На рис. 25 видно, что измеряемый на плоскости (на бумаге) горизонтальный угол равен разности $N_2 - N_1$ двух отсчётов по транспортиру в тех местах, где стороны угла соприкасаются с делениями транспортира.

В принципе, подобным образом измеряют и горизонтальные углы на местности с той лишь разницей, что в вершине

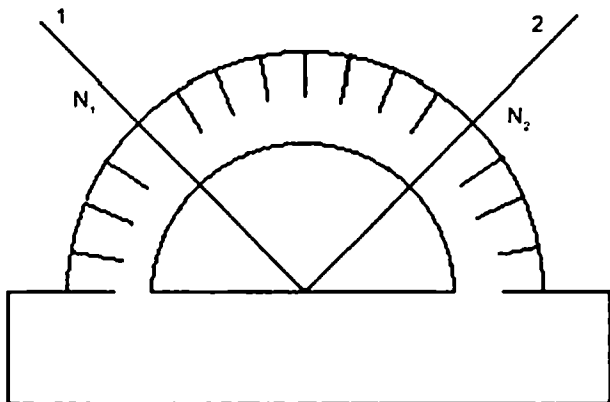


Рис. 25. Измерение угла на плоскости

измеряемого угла устанавливается измерительный прибор, проградуированный горизонтальный круг которого используется вместо указанного транспортира. И этот прибор измеряет угол β (рис. 26), который представляет собой проекцию двугранного угла, образованного двумя отвесными плоскостями V_1 и V_2 , на горизонтальную плоскость M .

И чтобы окончательно разложить всё по полочкам (а в нашем случае по углам), будем изъясняться более доступно. Если мой читатель в данный момент находится не на дискотеке, а в своей комнате, где и штудирует мой учебный опус, то в этой самой комнате обязательно имеются две смежные стены, вертикальные плоскости которых я уподобляю вышеотмеченному двугранному углу. Нижние части этих стен, которые граничат с полом, представляют собой два сходящихся ребра, которые я ассоциирую с проекциями. Угол между этими рёбрами (в нашем случае он будет составлять 90° , если у вас не овальный кабинет) и будет являться искомым горизонтальным углом β , представленным на рис. 26. В верхней части этого рисунка изображён горизонтальный круг угломерного прибора (лимб и алидада), по которому из разностей отсчитываемых направлений b_1a_1 и b_1c_1 (как и в случае измерения транспортиром на рис. 25), мы получим измеренный горизонтальный угол β , что собственно и требовалось доказать.

В очередной раз напоминаю, что горизонтальные углы в геодезии измеряются как один из параметров, в соответствии

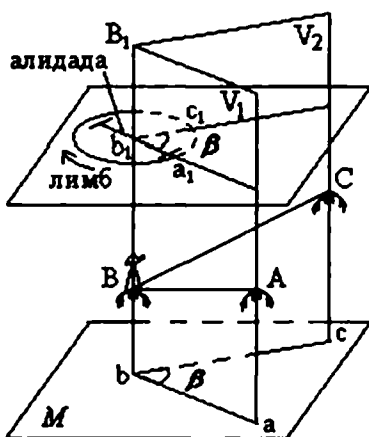


Рис. 26. Измерение горизонтального угла на местности

с всё той же магической формулой (1), для получения координат точек местности. По этим координатам мы определяем положение этой точки на карте. В дополнение к отмеченному, в целях достижения полного консенсуса, совсем неплохо, а точнее необходимо, установить и высоту точки, по направлению к которой мы измеряли искомый горизонтальный угол. Для этой цели понадобится тем же прибором измерить ещё один угол, который мы будем называть **вертикальным**. Если мы ведём речь о вертикальных углах, то, надеюсь, понятно, что в отличие от своих собратьев, горизонтальных углов, они будут лежать в одноименной плоскости, называемой вертикальной, и что измеряться они будут при помощи уже вертикального круга угломерного прибора. Отметим, что один и тот же прибор снабжён как горизонтальным, так и вертикальным угломерными кругами. Вертикальные углы в зависимости от отсчётного направления принято подразделять на углы наклона и зенитные расстояния (рис. 27). Давайте же определимся с этими новыми для вас понятиями. *Углом наклона* линии АВ называется угол ν_b между направлением линии АВ и горизонтальной плоскостью Н. *Зенитным расстоянием* линии АВ называется угол Z_b между отвесной линией (линией зенита AZ) и направлением измеряемой линии АВ. А теперь для полного и безоговорочного понимания не такой уж и сложной истины упростим вышесказанное. Для этого отметьте на полу своей комнаты точку А, а на потолке точку В и проведите между ними, разумеется, виртуальную линию. Угол между этой воображаемой линией и горизонтальной плоскостью вашего паркетного пола и будет являться углом наклона. А угол между

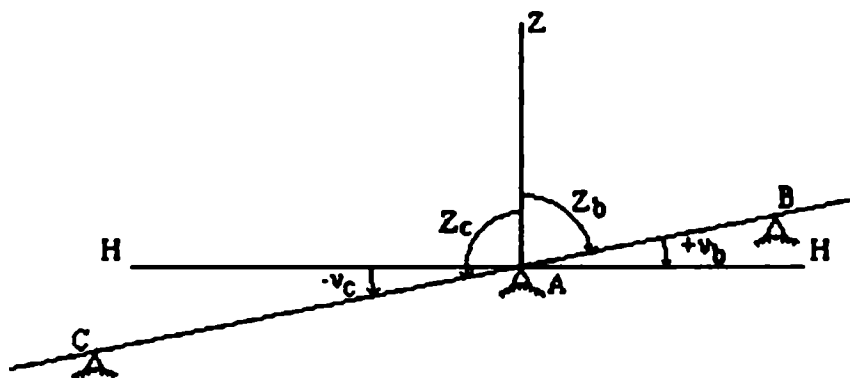


Рис. 27. Измерение вертикальных углов

той же самой линией АВ и вертикальной линией (перпендикуляром), проведенной из точки А к потолку и будет являться, упомянутым ранее, зенитным расстоянием.

Понятно, что углы наклона могут быть *положительными* (когда линия АВ выше горизонта) и *отрицательными* (когда линия АС ниже горизонта) и что по совокупности зенитное расстояние и угол наклона составляют прямой угол, т.е.

$$Z_{\text{в}} + \nu_{\text{в}} = 90^\circ \quad (20)$$

И последнее, что необходимо понять и запомнить: если горизонтальный угол измерялся как разность фиксаций двух наблюдаемых направлений по горизонтальному кругу (транспортиру) измерительного прибора, то вертикальный угол (угол наклона) измеряется также по разности отсчитывания двух направлений, но уже по вертикальному кругу того же прибора, причём здесь одним из направлений считается горизонтальное положение зрительной трубы геодезического прибора, а вторым - её наклонное положение при наведении на искомую точку.

С измерением углов, кажется, разобрались. Теперь попробуем осмыслить, как в геодезии измеряются расстояния. На первый взгляд представляется, что технология **линейных измерений** достаточно проста. Да и в самом деле, подумаешь, велика задача, измерить длину линии между двумя размеченными точками на местности. Но попробуйте взять обыкновенную рулетку, длина которой, предположим, пять метров, и измерить линию, равную тридцати метрам. Смею вас уверить, что если вы три раза будете измерять эту линию, то эти же три раза получите разные результаты. Не будем сейчас обсуждать величину отклонений, которую вы получите, а попытаемся выяснить их причину. Во-первых, мерная рулетка - весьма несовершенный прибор для измерений, вносящий в них соответствующие погрешности. Во - вторых, в процессе измерения придётся откладывать её шесть раз, прикладывая при этом определённые усилия, чтобы лента рулетки находилась точно в створе измеряемой линии, а это не так просто. В-третьих, реальная местность, в большинстве случаев, представляет собой весьма неровную поверхность с буграми, впадинами и различными препятствиями для измерений. В-четвёр-

тых, измеряемая линия может иметь углы наклона (как положительные, так и отрицательные), что, безусловно, тоже необходимо учитывать при измерениях. В-пятых, на измерения ощутимым образом влияют натяжение рулетки, температура и влажность воздуха. При желании и даже без желания список этих трудностей при измерении расстояний можно было бы продолжить. Таким образом, измерение расстояний в геодезии непростой и достаточно трудоёмкий процесс. Методологически его можно разделить на три способа: механический, геометрический и электромагнитный.

Механический метод как раз и предусматривает при измерении расстояний применение металлических мерных лент, рулеток, тросов и специальных (инварных) проволок. Характерная особенность этих механических приборов состоит в том, что все они последовательно укладываются в створе измеряемой линии. По разным причинам изготовить и сохранить в мерной ленте её проектное значение не представляется возможным. Поэтому перед измерением расстояний ленту подвергают процессу, который называется компарированием. Умное слово компарирование означает не что иное, как сравнение длины ленты, которой вы собираетесь измерять, с длиной эталонной ленты. В результате этого сравнения получают поправку, которую вводят в результаты измерений, которые проводят два мерщика в следующем порядке. В начале и в конце линии в точках А и Б (рис. 28) устанавливают деревянные вехи (1).

Задний мерщик прикладывает начало ленты (нулевое деление) в точку А, а передний мерщик, вооружённый набором металлических шпилек (2), натягивает ленту (3), укладывает

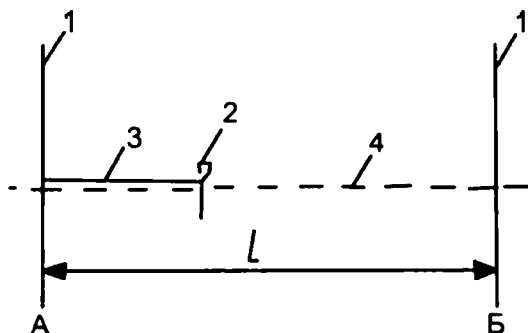


Рис. 28. Измерение линии лентой

её по направлению, указанному задним мерщиком, в створе измеряемой линии АБ (4) и закрепляет конец ленты одной из указанных шпилек. Затем процесс измерения продолжается в том же порядке, пока расстояние от очередной вставленной шпильки до искомой точки Б не окажется меньше длины ленты. Количество шпилек, собранных задним мерщиком, укажет число укладываний ленты. А длина линии АБ определится из простой формулы:

$$AB = l \cdot n + p \quad (21),$$

где l - длина ленты; p - остаток, представляющий отрезок ленты от последней шпильки до конца линии; n - количество шпилек.

Вот и вся технология, достаточно примитивного процесса измерения расстояний лентой. Однако, дорогие друзья, хочу подчеркнуть, что таким незатейливым способом измерений расстояний было создано огромное количество карт. Представьте себе эту нехитрую стальную ленту и эти незатейливые шпильки, которые избороздили кочковатую и болотистую тундру, заснеженные горы и непроходимые таёжные тропы для заветной и необходимой цели картографирования этих территорий. И ещё одно немаловажное отступление: при крупномасштабном картографировании местности измерение расстояний лентами применялось вплоть до 90-х годов прошлого столетия. При этом геодезическими инструкциями, наставлениями и руководствами строго настрого предписывалось при

измерении линий лентами достигать точность не менее $\frac{1}{2000}$.

Это означало, например, что точность измерения линии дли-

ной в 200 м не должна была превышать $\frac{200}{2000} = 0,1$ м или 10

см. Поверьте, что достичь эту заданную точность при измерении линии стальной лентой на склоне с падающими камнями или в зарослях лесных деревьев и кустарников, было совсем не просто.

Было бы ошибочным полагать, что во второй половине двадцатого века, когда искусственные спутники земли уже бороздили космическое пространство, расстояния в геодезии из-

мерялись только архаичными лентами и проволоками. Конечно, в то не такое уж давнее время уже существовали различные оптические приборы для измерений. Но конструкция этих приборов была настолько несовершенна, что точность изме-

ренного расстояния едва составляла $\frac{1}{300}$, т.е. расстояние, пред-

положим, равное 100 м, измерялось с ошибкой $\frac{100}{300} = 0,33$ м.

Точность измерения такого же расстояния лентой получалось

почти на порядок точнее ($\frac{100}{2000} = 0.05$ м). Поэтому ответствен-

ные линейные измерения проводились мерной лентой, а геодезические работы, требующие меньшей точности, выполнялись посредством оптических приборов. Такими приборами производилась, например, топографическая съёмка местности, с принципом производства которой мы познакомимся чуть позже.

А сейчас давайте разбираться, как же измерялись расстояния этими приборами. Сам прибор назывался нитяным дальномером. По сути дела он не являлся самостоятельным прибором, так как в поле зрения труб инструментов для измерения углов и высот, кроме основных, вертикальных и горизонтальных нитей (штрихов), наносились дальномерные нити а и b (рис. 29). С их помощью по дальномерной рейке АВ определялось расстояние D на местности. Измерение расстояний этим нитяным дальномером осуществлялось *геометрическим методом*. Тут настоятельно рекомендую вспомнить из курса школьной геометрии не такую уж сложную теорему о подобии треугольников (рис. 29).

Прежде всего, определимся с обозначениями на рисунке. D - это расстояние между двумя точками на местности: точкой, на которой стоит прибор, и точкой, в которую помещена дальномерная рейка, а D' - расстояние от переднего фокуса объектива до рейки, f - фокусное расстояние объектива, δ - расстояние от оси вращения прибора до объектива, $ab = P$ - расстояние между дальномерными нитями зрительной трубы, и $AB = n$ - число делений между дальномерными нитями а и b, взятых по рейке АВ. Итак, искомое, как говорят математики, расстояние D определится (это хорошо просматривается на

рис. 29) из простого соотношения:

$$D = D' + f + \delta. \quad (22)$$

Принимая во внимание, что в современных приборах величина $f + \delta$ близка к нулю, получим:

$$D = D'. \quad (23)$$

Теперь обратимся к обещанному ранее подобию треугольников ABF и a_1b_1F , из которого следует:

$$\frac{ab}{AB} = \frac{f}{D} \quad (24)$$

или

$$\frac{P}{n} = \frac{f}{D}. \quad (25)$$

Отсюда

$$D = \frac{fn}{P}. \quad (26)$$

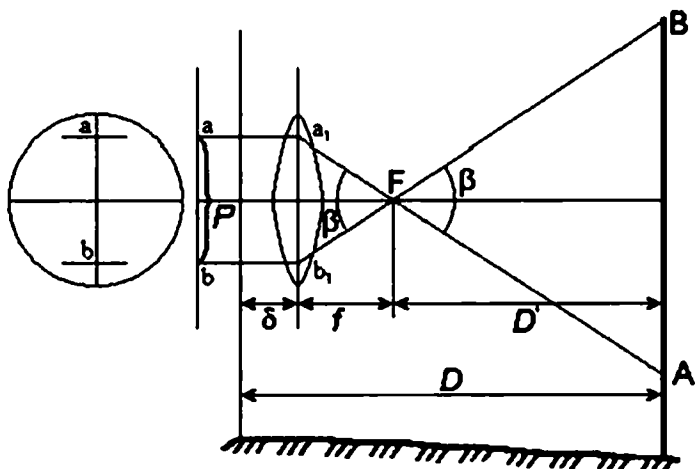


Рис. 29. Определение расстояний оптическим нитяным дальномером

Отношение фокусного расстояния к расстоянию между дальномерными нитями на трубе $\frac{f}{p}$ является величиной постоянной, называемой коэффициентом дальномера. Обозначим его через K . Тогда

$$D = K \cdot n \quad (27)$$

При конструировании и изготовлении дальномеров фокусное расстояние объектива зрительной трубы f выполняют равным 200 мм, а расстояние между дальномерными нитями $p = 2$ мм. Тогда получается, что коэффициент дальномера $K = 100$ и формула (27) принимает совсем простой, удобный для практического применения вид

$$D = 100 \cdot n \quad (28)$$

Резюме: чтобы измерить расстояние между двумя точками на местности нитяным дальномером, следует навести зрительную трубу на дальномерную рейку и взять два отсчёта $A = 1,246$ м по верхней дальномерной нити a и $B = 0,736$ м по нижней нити b и в соответствии с полученной формулой (28) полученную разность $n = 0,510$ умножить на 100. И, таким образом, измеренное расстояние будет составлять 51 м. На практике геодезисты максимально упрощают процесс линейных измерений, подводя специальным микрометрическим винтом прибора нижнюю дальномерную нить b на отсчёт A , равный 1,000 м и тогда отсчёт B по верхней нити a составит 1,510 м и полученная разность n даст нам искомое расстояние 51 м. Вот так легко и просто, и всё это на основании затаянного вывода искомой формулы (28).

И ещё одно маленькое резюме. Мы с вами, дорогие коллеги, совместными усилиями успешно покончили с механикой и геометрией измерения расстояний, что составляют квинтэссенцию двух изученных нами методов. Настало время рассмотреть ещё один способ линейных измерений, который называют пугающими словами *электромагнитный метод*. Но, как говорят, не так уж страшно то, чего поначалу боятся. Так что, впредь и с песней. А вместо песни напомним вам, что в начале этой книги я упоминал, что, будучи студентом, ваш покорный

слуга изучал двухсеместровый курс светодальномерных и радиодальномерных геодезических измерений, в основу которых как раз и положен электромагнитный метод. И, по правде говоря, я совсем не собираюсь напевать вам электромагнитную песню, которую напевал мне преподаватель в течение двух долгих семестров. Да и книга моя всё-таки называется "Введение в специальность" и ставит цель познакомить вас с основами геодезии, а не с её расширенными и углублёнными понятиями. Поэтому, полагаю, будет правильным ограничиться лишь припевом упомянутой песни, в котором остаётся изложить только принцип и суть метода. А если так, то будьте добры, коллеги, прислушаться к моему короткому припеву, из которого, как говорится, слов не выкинешь. А вот и слова.

В основе электромагнитных методов линейных измерений лежит использование электромагнитных колебаний. В зависимости от вида создаваемых колебаний приборы для измерения делятся на радио- и светодальномеры. Все электромагнитные дальномеры состоят из двух приборов: приёмопередатчика и отражателя. Один из них устанавливается над начальной, второй – над конечной точкой линии. Приёмопередатчик получает электроэнергию от входящего в комплект аккумулятора или электробатарей, излучает энергию света или радиоволн, преобразует (модулирует) электромагнитные волны до необходимых параметров, направляет модулированные волны на отражатель и принимает возвратившиеся от него волны, прямо или косвенно измеряя время их распространения. Отражатель принимает и отражает направленные на него волны к приёмопередатчику. Несмотря на академичность и строгость изложения, представляется, что изложенный принцип вам понятен. А вот концовка моего монолога предельно проста. Для вас, друзья не является секретом, что расстояние между точками в общем, можно сказать, каноническом случае определяется как скорость, умноженная на время, необходимое для преодоления этого расстояния. Не составляет исключения и наш частный "дальномерный" случай, который описывается формулой

$$D = 0,5 \cdot V \cdot t, \quad (29)$$

где V – скорость распространения электромагнитных волн;
 t – время прохождения волнами расстояния $2D$.

Поскольку скорость распространения волн V - величина известная (299 792 458 м/с), а время t получается из измерений, то нет никаких проблем получить расстояние. Только, друзья, не забудьте умножить его на коэффициент 0,5, так как измеренное прибором время фиксируется при прохождении волнами двойного расстояния (от прибора до отражателя и обратно).

Вот, пожалуй, и всё относительно измерения углов и расстояний, изложенного мною в конспективной форме. Однако этот конспект будет неполным, если к слову измерение не привязать слово точность. Эти два понятия, словно два альпиниста при штурме скалистой вершины, всегда находятся в одной неразрывной связке. Да и что там говорить, слово точность в геодезии является ключевым. Точность, в конечном итоге, является важнейшей характеристикой измерений, отражающей близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Конечно же, по всем объективным и даже субъективным причинам любое измерение сопровождается ошибками. В глобальном плане задача состоит в том, чтобы свести эти ошибки к минимуму. Студенты геодезических специальностей в обязательном порядке проходят курс теории ошибок измерений. Эта дисциплина на основе вероятностных и статистических методов изучает свойства ошибок и законы их распределения, а также способы вычисления числовых характеристик точности измерений. Не пугайтесь, дорогие коллеги, никаких вероятностных и статистических оценок и критериев я вам здесь давать не буду. Это уже выходит за рамки тех сведений, с которыми я наметил вас познакомиться. А говорю я о теории ошибок измерений только потому, что горю желанием, чтобы в самых затаённых уголках ваших мозговых извилин осталось понятие, что расчёт и оценка точности результатов измерений является главнейшей частью геодезического функционирования.

Усвоили? Замечательно! Ну а теперь о точности измерения углов, которая складывается из погрешностей прибора, его центрирования, установки визирных целей и влияния внешних условий. Приборные ошибки вызываются множеством причин, главными из которых являются: неточность визирования, неточность нанесения делений на угломерных кругах и нарушение соотношения геометрических осей прибора. Ошибка центрирования прибора заключается в том, что его вертикаль-

ная ось вращения не совпадает с центром знака, над которым он установлен. То же касается и установки визирных целей, т.е. устройств, на которые наводится зрительная труба прибора. Наконец и о влиянии внешних условий. Оно многофакторно и зачастую является главной составляющей ошибки измерений. Причём, если приборные ошибки сводятся к минимуму соответствующей методикой измерений, то уменьшить ошибки, вызванные влиянием внешних условий, очень не просто. Что же это за таинственные внешние условия, которые так аномально мешают нам получать качественные измерения? Это и ветровые помехи, и колебания прибора под ударами воздушных масс, и нагрев или охлаждение прибора вследствие перепада температур. Но самой злобещей ошибкой внешних условий, настоящим наказанием для геодезистов, является ошибка, вызываемая рефракцией светового луча. И если так получилось, друзья, что вы позабыли, на какой полке книжного шкафа покоится ваш школьный учебник физики, то я осмелюсь напомнить вам, что в разделе "Оптика" этого потрепанного учебника чёрным по белому написано "рефракция - это преломление лучей света в земной атмосфере, вызванное вследствие её неоднородности". Именно поэтому световой луч, исходящий из зрительной трубы прибора, отклоняясь от прямолинейного движения по дороге к визирной цели, на которую он был направлен, многократно преломится, а точнее говоря, исказится и попадёт совсем не в то место визирной цели, где ему надлежало бы быть по законам классической оптики. Разумеется, перечисленное вызовет погрешности в измерениях углов. Однако, несмотря на значительные трудности, геодезическая наука разработала целый ряд методик, позволяющих ощутимо уменьшить ошибки, вызванные рефракционными искажениями, и добиться суммарной точности угловых измерений, достигающей в современных угломерных приборах буквально несколько секунд.

Теперь о точности измерения расстояний. Если помните, то при измерении стометровой линии на местности стальной лентой мы допускали ошибку в 5 см, а при использовании оптического нитяного дальномера ошибка измерения той же линии составляла уже более 30 см. Вспомнили, вот и хорошо. А теперь забудьте. Сегодня современные приборы измеряют расстояния с миллиметровой точностью, а короткую линию, равную тем же 100 м, измеряют с ошибкой, не превышающей

буквально несколько десятых долей сантиметра.

Итак, уважаемый читатель, мы с вами обсудили, как измерять, что измерять и лишь вскользь коснулись вопроса, а чем, собственно говоря, измерять углы и расстояния. В подавляющем большинстве случаев своих не совсем навязчивых объяснений я называл измерительные средства обобщающим словом прибор (в обиходе геодезисты называют приборы инструментами). Геодезическое инструментоведение составляет важнейшую часть геодезической науки. Ведь с практической точки зрения, качество измерительного процесса в значительной степени зависит от приборной базы. Поэтому студенты геодезической специальности изучают основные положения физической и геометрической оптики, необходимой для понимания работы сложных современных геодезических приборов, а также принцип действия электронных и цифровых геодезических инструментов, их устройство и методы эксплуатации. Совсем не хочется загромождать этот вводный курс в геодезию сложными схемами, объясняющими принцип работы измерительных приборов, да в этом, видимо, и нет необходимости. Нет надобности и приводить их разветвлённую классификацию. На сегодняшний день будет достаточно, если в вашем лексиконе появится три новых слова: теодолит, нивелир и электронный тахеометр.

Теодолит - это прибор, предназначенный для измерения горизонтальных и вертикальных углов. Добавлю только, что с помощью теодолита, можно измерять и расстояния, поскольку в нём вмонтирован нитяной дальномер, принцип работы которого мы изучили ранее.

Нивелир - это прибор, который измеряет превышения между точками, с помощью которых затем вычисляются их высоты. С методологией определения высот точек земной поверхности мы познакомимся в следующей главе.

Электронный тахеометр - это высокоточный высококачественный современный геодезический прибор. К прилагательным, которые я присоединил к слову прибор, можно добавить ещё и эпитеты: универсальный и интеллектуальный. Универсальный потому, что конструкторам удалось объединить в одном приборе и теодолит, и дальномер, и нивелир. Действительно, на мониторе электронного тахеометра на основе измеренных горизонтальных и вертикальных углов и расстояний высвечиваются координаты и высоты точек. А интеллек-

туальным электронный тахеометр является потому, что всё перечисленное выполняет, встроенный в него компьютер, который не только позволяет решать огромный комплекс различных геодезических задач, а и обеспечивает управление прибором, контроль и хранение результатов измерений.

Приборы составляют неотъемлемую часть напряжённой работы инженера-геодезиста, поэтому, пусть несколько тезисно и сжато, познакомимся с устройством и принципом работы геодезических приборов. Начнём с теодолита (рис. 30).

Итак, теодолит является оптическим прибором, предназначенным для измерения горизонтальных и вертикальных углов на местности. Теодолит закрепляется на штативе с помощью подставки 2, оборудованной тремя подъёмными винтами 1. С помощью этих винтов и посредством уровня 4, теодолит приводят в горизонтальное (рабочее) положение и наводят зрительную трубу, снабжённую окуляром 6 и объективом 9, поочерёдно на вехи, расположенных на лучах, расходящихся от вершины угла, в которой расположен прибор. В зависимости от того, какой угол измеряется, с помощью специальных устройств (на рис. 30 не показаны) берут отсчёты по горизонтальному 3 или вертикальному 7 кругам. Вот и вся музыка, коллеги. Ну а тех кто, прошу прощения, позабыл принципы определения горизонтальных и вертикальных углов, я рискну отослать к объяснению к рис. 25, 26 и 27.

Сейчас переходим к другому типу приборов, которые называются нивелирами. Этот прибор предназначен для измерения превышений, которые, в конечном итоге, позволяют нам вычислить высоты точек земной поверхности. Здесь я должен прервать свой монолог с тем, чтобы признаться вам, господа обучающиеся, что в данный момент я нахожусь в затруднительном, чтобы не сказать в некорректном, положении. На предыдущих страницах этой книги я руководствовался принципом, прежде всего излагать концепцию, т.е. теорию и фабулу метода измерений, и только потом средства этих измерений. Здесь я нарушаю отмеченное, чтобы поместить устройство приборов в одном параграфе с тем, чтобы в очередной раз заверить вас, что буквально через несколько страниц в следующей главе вы познаете теорию метода нивелирования.

А пока, дамы и господа, к бою, я имею в виду к нивелиру.

Как видно из рис. 31, нивелир представляет собой совсем несложный прибор, который, как и теодолит снабжён подъём-

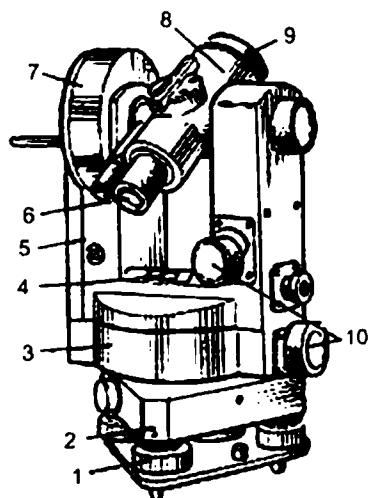


Рис. 30. Устройство теодолита

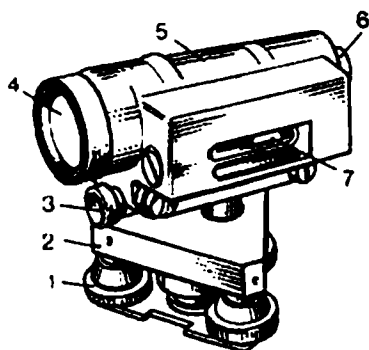


Рис. 31. Устройство нивелира

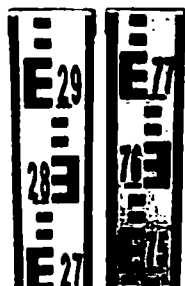


Рис. 32. Нивелирная рейка

ными винтами 1, подставкой 2, зрительной трубой 5 с объективом 4 и окуляром 6 и уровнем 7. Неотъемлемой частью приложения к нивелиру является комплект реек (рис. 32).

Несколько слов о принципе работы нивелира. Зрительная труба нивелира, стоящего между точками А и В местности, поочерёдно наводится на помещённые на них рейки. Горизонтальный луч визирования отсекает на этих рейках два отсчёта, разность между которыми и представит искомое превышение между этими точками (детальнее об этом в следующей главе).

Теперь, коллеги, о более сложном приборе, который называется электронный тахеометр (рис. 33).

Здесь следует подчеркнуть: при картографировании местности сегодня геодезисты всего мира используют электронный тахеометр, который при измерении позволяет в компьютерном виде получить необходимые для изготовления топографической карты прямоугольные координаты X , Y и высоты H точек местности непосредственно в процессе измерений.



Рис. 33. Электронный тахеометр

ГЛАВА 5

ТРЕТЬЯ КООРДИНАТА, ИЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ ТОЧЕК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Третья координата точек земной
поверхности. Сущность, способы
и точность нивелирования.
Геометрическое нивелирование.
Тригонометрическое
нивелирование**

*Пусть вам расскажут эти строчки:
Координаты - на посту.
Чтоб показать в пространстве точки,
Мы выбираем высоту.*

Итак, уважаемые дамы и господа, вы уже чётко представляете, что вся геодезическая наука насквозь пропитана вытянутыми в "далёкое далёко" красочными символами координат X и Y . В конечном итоге по этим координатам, получаемым по результатам измерений углов и расстояний, наносятся ситуационные точки местности на бумагу, совокупность которых, после определённых процедур, превращает набор этих точек в карту. Однако элементы ситуации (дороги, здания, мосты, инженерные сооружения, реки, леса и т.д.) являются важнейшей, но не единственной характеристикой окружающего нас натурального ландшафта. Природа изобилует также неровностями и изрезанностью форм земной поверхности, различающимися своими очертаниями и размерами. Всё многообразие этих форм принято называть словом **рельеф**, которое происходит от латинского слова *relevo* - поднимать. Выра-

зитель глубины и разнообразие эти самых поднятий только двумя координатами X и Y просто не представляется возможным. Поэтому, хотим мы этого или не хотим, у нас просто нет другого выхода, как, дополнительно к измерению углов и расстояний, ввести в геодезический обиход третье измерение, технологию производства которого мы назовём **нивелированием**. И точно так, как по измеренным углам и расстояниям мы вычисляли координаты X и Y , по результатам измеренных превышений в нивелировании мы будем определять третью координату H , которую назовём *высотой точки земной поверхности*. Итак, теперь мы оперируем тремя координатами X , Y , H , определяющими положение рассматриваемой точки. И не надо быть великим математиком, чтобы заключить, что три координаты определяют положение точки не на плоскости, а в трёхмерном пространстве. Применительно к местности отмеченное полностью соответствует действительности. А как же быть с картой? Ведь карта есть не что иное, как плоское изображение местности, и представить положение точки, измеренной на вершине Эвереста, на карте в пространственном изображении невозможно. И с этим трудно не согласиться. Тем не менее, выход был найден, и рельеф стали изображать на картах с помощью горизонталей. Ранее (см. главу III) был рассмотрен метод проведения горизонталей. Но как бы там ни было, для изображения рельефа на картах, да и для многих других целей мы просто обязаны определять высоты H точек земной поверхности.

Прежде всего, давайте чётко определимся, что мы понимаем под высотой точки. С геометрической точки зрения высота является перпендикуляром, опущенным с точки, находящейся, например, на высочайшей вершине кавказских гор на Эльбрусе. Здесь у матросов, т.е. у вас, любезных, нет вопросов. Но где же находится основание этого перпендикуляра? Вот в чём вопрос, почти, как у Гамлета. Трудно сказать, знали Гамлет, а вместе с ним Вильям Шекспир, где начинается этот перпендикуляр. А вот вы, дамы и господа, наверняка знаете. Да, конечно же, на уровне моря. И ещё один вопрос, на уровне какого моря, Красного, Чёрного или Средиземного? А собственно, какая разница, море, оно, говорят, и в милой Африке – море. Оказывается в Европе, в Австралии и в той же Африке моря разные, не с точки зрения цвета морской волны, а относительно уровня. Здесь самое время заметить, что

в теоретическом плане поверхность Мирового океана и сообщаемых с ним морей представляют поверхность одного уровня, высота которого равна нулю. Но это относится к случаю, когда Мировой океан и все моря, входящие в него, находятся в состоянии полного покоя и равновесия. А случай этот имеет место быть только в теории. Критерием истины, как известно, является только практика. А на практике существуют приливы и отливы, атмосферное давление, ветер, осадки, океанические течения, материковый сток воды и т.д. Поэтому уровень моря является постоянной величиной только в глобально-теоретическом аспекте, и поэтому в каждой стране выбирают своё локальное море, в котором от некоего "маркера" по отвесной линии к данной точке измеряют высоту, называемую абсолютной высотой данной точки земной поверхности. В России таким "маркером" является футшток, представляющий собой горизонтальную черту на медной пластине, которая фиксирует многолетний уровень моря. Где же находится этот футшток? В России, в северо-западной её части находится Балтийское море, в нём - Финский залив, на берегу этого залива расположен город Кронштадт. Тут проходит Обводной канал, через который перекинут мост. В опору этого моста и вмонтирована указанная медная пластина, от горизонтальной черты которой и отсчитывают абсолютные высоты в России, а система этих высот получила название Балтийской. Подписанная на карте 5642 м высота Эльбруса означает расстояние, измеренное по отвесной линии от нуля Кронштадтского футштока до самой высокой точки этой горной вершины.

Если ранее акцентировалось, что координаты точек X и Y не измеряются, а вычисляются по измеренным углам и расстояниям, то и теперь по аналогии можно сказать, что высоты H точек земной поверхности тоже не измеряются, а вычисляются по *измеренным превышениям*. Превышением мы будем называть разность высот измеряемых точек или отвесную линию между этими точками, показывающую насколько одна из точек выше или ниже другой. Измерение превышений производится действием или измерительной технологией, называемой нивелированием. По методам измерения нивелирование делится на геометрическое, тригонометрическое и барометрическое.

Суть **геометрического нивелирования** заключается в определении превышения между двумя смежными точками с по-

мощью горизонтально направленного луча от зрительной трубы прибора на нивелирные рейки, стоящие в этих точках. Из всех видов нивелирования оно самое точное, с помощью специальных методик и соответствующих приборов его точность может достигать десятых долей миллиметра. Несмотря на высокую точность, недостатком геометрического нивелирования является короткая длина визирного луча, т.е. невозможность определения превышения между точками, находящимися на значительном удалении друг от друга.

В отличие от геометрического **тригонометрическое нивелирование** выполняется наклонным лучом геодезического прибора. Оно основано на использовании тригонометрической зависимости между определяемым превышением и измеряемыми углом наклона визирного луча и расстоянием между нивелируемыми точками. По сравнению с геометрическим тригонометрическое нивелирование можно производить на большие расстояния, но оно уступает ему в точности, достигая величин, равных нескольким сантиметрам.

Наиболее удобно в производстве измерений **барометрическое нивелирование**. Оно выполняется с помощью барометров, действие которых основано на известной зависимости между атмосферным давлением и высотой над уровнем моря. При этом виде нивелирования по измеренным барометром величинам атмосферного давления в двух точках определяется превышение между ними. Следует, тем не менее, отметить, что насколько барометрическое нивелирование просто в исполнении, настолько оно и неточно. Ошибки баромет-

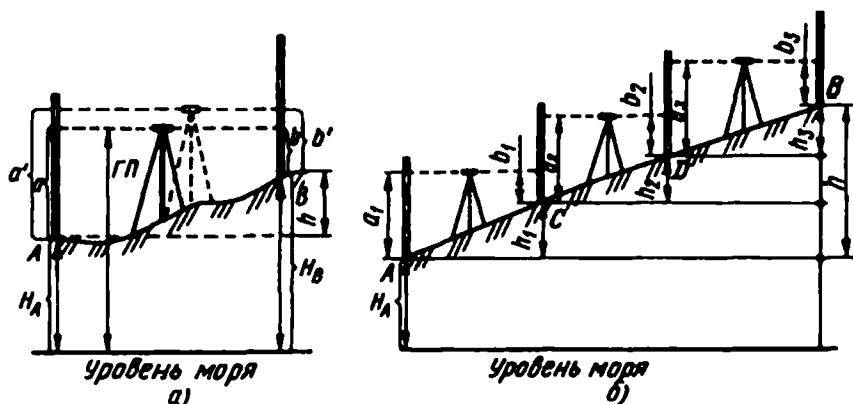


Рис. 34. Геометрическое нивелирование

рического нивелирования колеблются в метровом диапазоне и в среднем достигают 1–2 м.

Рассмотрим принципы геометрического и тригонометрического нивелирования в расширенном ракурсе. Начнём с *геометрического нивелирования*.

Для этого обратимся к рис. 34, а. На нём изображены две точки земной поверхности А и В. Предположим, что высота одной из них H_A известна, а высоту другой H_B следует определить. Наведём поочерёдно зрительную трубу нивелира на рейки, находящиеся в рассматриваемых точках А и В. Нивелирная рейка представляет собой деревянную или алюминиевую трёх- или четырёхметровую линейку, на которую в виде кубиков нанесены сантиметровые деления. Луч, исходящий от трубы нивелира и достигающий поверхности реек, представляет собой горизонтальную линию визирования, параллельную уровенной поверхности, т.е. уровню моря, от которого мы отсчитываем высоты. В объективе зрительной трубы мы отчётливо видим место попадания этого луча на рейке. Всё, что нам остаётся сделать, это измерить расстояния a и b (отсчёты по рейкам) от нуля реек до места пересечения их визирным лучом нивелира. В этой простой процедуре вся суть метода. А дальше простая, можно сказать, школьная геометрия. Поэтому и способ нивелирования называется геометрическим. Да и в самом деле, посмотрите ещё раз на рис. 34, а. Из него следует, что высота H_B точки В, которую мы отыскиваем, равна

$$H_B = H_A + h, \quad (30)$$

где h - превышение между точками А и В.

Нетрудно заметить, что

$$a = b + h. \quad (31)$$

Откуда следует, что

$$h = a - b. \quad (32)$$

И таким образом, подставляя (32) в начальную формулу (30), окончательно получаем

$$H_B = H_A + a - b \quad (33)$$

Ну что ж, друзья, можно сказать, что приехали. В полученной простой формуле (33) и смысл, и сущность, и, выражаясь более пространно, квинтэссенция геометрического нивелирования. И, действительно, нет ничего проще. В конечном итоге, чтобы получить высоту определяемой точки, следует к высоте исходной (известной) точки добавить отсчёт a по задней рейке и вычесть отсчёт b по передней рейке.

Следует отметить один немаловажный штрих. На самом деле, это вовсе не штрих, а тоже квинтэссенция. Итак, закрываем глаза и включаем воображение, не моё, а ваше воображение, коллеги. Представим себе очень крутой склон, на котором на расстоянии, скажем, 20 м между собой находятся две точки, в которых помещены трёхметровые рейки, а нивелир находится посередине между ними. Угол наклона настолько большой, что при неизменной горизонтальной линии визирования нивелира, при взгляде на заднюю рейку мы увидим не рейку (луч визирования пройдёт намного выше), а фрагмент лазурного неба. При взгляде на переднюю рейку (из-за крутизны склона луч визирования пройдёт ниже рейки) мы увидим в поле зрения трубы только землю. Что же делать? Существуют две опции: заканчивать измерения и идти пить пиво, если, конечно, вы найдёте в горах, в тайге или тундре пивной ларёк. Или (эта опция представляется наиболее оптимальной) уменьшать расстояния между точками до тех пор, пока в поле зрения трубы нивелира вы не увидите как переднюю, так и заднюю рейки.

И напрасно вы думаете, уважаемые дамы и господа, что я просто так заставил вас напрячься и дал команду включить воображение. Сделал это я только для того, чтобы вы уяснили, что производство геометрического нивелирования ограничено дистанционными пределами, особенно на местности со значительными уклонами. И если вы, коллеги, абстрагируетесь от книжной страницы, на которой сейчас находитесь и, снова включив воображение, перенесётесь на склоны заснеженного Эльбруса, то, поверьте, никакого воображения не хватит, чтобы представить, сколько стоянок нивелира следует сделать, чтобы измерить высоту этой высшей точки Европы. Наверняка, и это при самом грубом подсчёте, количество таких стоянок (в нивелировании их называют станциями) составит не менее несколь-

ких тысяч. Давайте представим себе, что мы начали делать такое нивелирование. Само собой разумеется, что у меня просто не хватит бумаги, чтобы показать такое количество станций нивелирования на чертеже. Однако чтобы понять динамику процесса измерений, ограничимся только тремя станциями (рис. 34, б). И опять простая геометрия, настолько простая, что осмелюсь привести вывод конечной формулы без комментариев, всё просматривается из рисунка.

$$H_H = H_A + h \quad (34)$$

$$h = h_1 + h_2 + h_3 \quad (35)$$

$$h_1 = a_1 - b_1 \quad (36)$$

$$h_2 = a_2 - b_2 \quad (37)$$

$$h_3 = a_3 - b_3 \quad (38)$$

$$H_H = H_A + (a_1 + a_2 + a_3) - (b_1 + b_2 + b_3) \quad (39)$$

Экстраполируя суммы отсчётов по задней и передней рейкам на количество станций, равное n , окончательно получим

$$H_H = H_A + \sum_{i=1}^n (a_i - b_i). \quad (40)$$

Следовательно, когда речь идёт о нивелирной цепочке (в геодезии это принято называть нивелирным ходом), которую мы с вами сейчас успешно разрешили, то для определения высоты конечной точки такого нивелирного хода необходимо к известной высоте начальной точки приплюсовать сумму разностей отсчётов по задней и передней рейкам.

Совсем неплохо было бы ещё раз напомнить, что геометрическое нивелирование производится горизонтальным лучом, исходящим из зрительной трубы нивелира, при этом труба прибора может перемещаться только и исключительно в горизонтальной плоскости. *Тригонометрическое нивелирование*, к которому мы плавно переходим, производится теодолитом или электронным тахеометром, зрительная труба которого вращается как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. В отличие от геометрического нивелирования, мы имеем возможность, поднимая или опуская трубу прибора, навести её на любое место рейки или отражателя (в случае применения

электронного тахеометра). Достигается это посредством уже наклонного визирного луча. Вы мгновенно поймёте это, выполняя мою команду: "Внимание на рис. 35".

Вспомним, что для нахождения высоты точки В, в соответствии с формулой (34), нам необходимо к известной высоте точки А добавить, неизвестное пока, превышение между точками А и В. Из геометрических построений (рис. 35), вытекает, что

$$AJ + CL = KB + BL. \quad (41)$$

Из прямоугольного треугольника JLC следует, что

$$\frac{CL}{JC} = \tan v. \quad (42)$$

Отсюда

$$CL = JC \cdot \tan v. \quad (43)$$

Подставляя (43) в (41) и придерживаясь обозначений рис. 34, получим

$$i + S \cdot \tan v = h + V. \quad (44)$$

И в окончательном виде превышение h определится из выражения

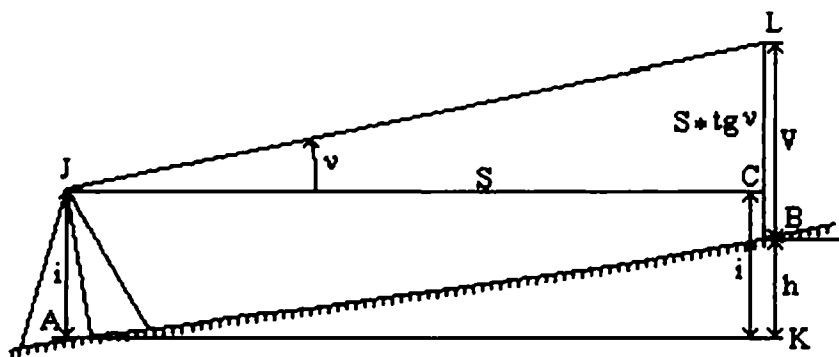


Рис. 35. Принцип тригонометрического нивелирования

$$h = i + S \cdot \tan v - V, \quad (45)$$

где i - высота прибора; S - горизонтальное проложение наклонного расстояния JL ; v - угол наклона; V - высота визирной цели.

Резюме: чтобы получить превышение между точками А и В методом тригонометрического нивелирования, следует измерить (рулеткой) высоту прибора, измерить горизонтальное расстояние S , измерить угол наклона v , измерить высоту касания наклонного луча прибора на рейке (с применением теодолита) или на отражателе (при использовании электронного тахеометра).

Интерпретация: используя метод тригонометрического нивелирования для измерения высоты вышеупомянутого горного исполина Эльбруса, теперь нет необходимости делать несколько тысяч стоянок прибора, карабкаясь с ним по неприступным скалам и ледникам, как это выполнялось при геометрическом нивелировании. Простая тригонометрическая формула в принципе позволяет нам определить высоту этой вершины с точки, где установлен прибор. Именно методом тригонометрического нивелирования индийский геодезист Радханат Сикдар в 1852 году измерил высоту Эвереста, получив отметку - 8839 м. В 2005 году китайские геодезисты измерили эту же уникальную вершину спутниковыми методами GPS, высота Эвереста по их данным составила 8844 м. Разность по времени в 150 лет со всеми, происходящими за этот период техническими революциями и технологическими переворотами, составила разность измерений всего в 5 метров. Вот такой довод в пользу тригонометрического нивелирования.

Всё, леди и джентльмены, приехали, кажется, вдали показались контуры следующей станции, к которой наш геодезический поезд, продолжая своё неторопливое движение, неуклонно приближается.

ГЛАВА 6

ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ СЪЁМКА МЕСТНОСТИ

Понятие о картографировании и топографической съёмке. Виды топографических съёмок. Наземная топографическая съёмка. Аэрофотосъёмка

*Бывает трудно при топосъёмке,
Но всё, что видим, нанесли
Для вас, грядущие потомки,
На карту матушки Земли.*

Из окон нашего поезда, дорогие коллеги, уже хорошо просматривается фронтон вокзала, к которому мы подъезжаем. На нём крупным курсивом выведено слово "съёмка", выхваченное из заголовка этой главы, в которой оно доминирует как ключевое. Больше того, в геодезии это слово является узловым и, следуя нашей железнодорожной аллегории, даже магистральным. Само слово съёмка означает процесс создания какого-либо изображения. Киносъёмка, например, предусматривает создание изображения на экране кинотеатра, а видеосъёмка - на мониторе компьютера и телесъёмка - на экране телевизора. Мы же с вами, дамы и господа, незамедлительно начнём обсуждать вопросы, связанные с производством **топографической съёмки**. Здесь в роли субъекта (изображение) выступает местность, а роль объекта (экран) выполняет топографическая карта. Поэтому и съёмка называется топографической, но в качестве синонима вышесказанного можно подобрать слово *картографирование*. Хотя, если уж быть строгим до конца, то кар-

топографирование есть совокупность процессов, методов и технологий создания карт. А *топографическая съёмка* - это комплекс геодезических работ, выполняемых с целью получения карты. В чём здесь, собственно говоря, соответствие, а в чём несоответствие? Следуя чеховскому принципу "мыслям широко, а словам тесно", буду предельно краток и позволю себе сформулировать резюме всего двумя предложениями. Соответствие, т.е. общее в том, что как картографирование, так и топографическая съёмка решают одну и ту же задачу: *создать карту*. А несоответствие (различие) в том, если съёмка есть не что иное, как процесс измерений для создания карты, то картографирование является понятием более обобщающим, включающим в себя и технологические процессы по производству карты на основе результатов измерений.

В конечном итоге, коллеги, думаю, что настало время завершать моё то ли лингвистическое, то ли филологическое исследование слов картографирование и топографическая съёмка и экстренно перейти к их технологическому осмыслению. Итак, начинаем. Различают три вида топографической съёмки: космическая съёмка, аэрофотосъёмка и наземная съёмка. Наше знакомство с методами съёмки будем производить от далёкого к близкому: от заоблачных небес, где, говорят, прячется Всевышний, до нашей голубой планеты, родимой кормилицы Земли. Таким образом, вникаем в понятие космическая съёмка.

Космическая съёмка - это съёмка земной поверхности, производимая с космических летательных аппаратов, оборудованных специальной фотографической, радиолокационной, сканерной и другой аппаратурой, посредством которой получают космические снимки. Получение обширной информации о земной поверхности обеспечивают как беспилотные космические аппараты, устанавливаемые на искусственных спутниках Земли, так и пилотируемых космических кораблей или с пилотируемых орбитальных станций. Так, например, в России съёмка Земли производилась с орбитальной станции "Мир", а в США - с пилотируемых космических кораблей серии "Шаттл". Высота орбит, откуда производится космическая съёмка, в зависимости от масштаба и других различных факторов составляет от 150 до 1000 км. И ещё необходимо отметить, что космическая съёмка выполняется, как правило, для создания карт, покрывающих огромные территории земной поверхности.

А теперь спустимся чуть ниже и определимся с понятием аэрофотосъёмка. *Аэрофотосъёмкой* называется фотографирование земной поверхности при помощи аэрофотоаппарата, установленного на борту летательного аппарата (самолёт, вертолёт или дирижабль). Фотографирование при аэрофотосъёмке производится с высоты от нескольких сотен метров до десятков километров. Аэросъёмка производится, как правило, когда площадь снимаемого участка превышает 500 гектаров ($\approx 2,2 \text{ км} \times 2,2 \text{ км}$), а масштаб изготавливаемой карты мельче 1 : 5000. Как правило, аэрофотосъёмка охватывает территории крупных населённых пунктов или их частей. Поскольку аэрофотосъёмка составляет весомую часть в составлении топографических карт, чуть ниже обязательно более подробно познакомимся с технологическими особенностями её производства.

Несмотря на то, что космос космосом, спутники спутниками и самолёты самолётами, вынужден акцентировать, друзья, что и на сегодняшний день всё-таки самым востребованным остаётся *наземный метод топографической съёмки*. Итак, спускаемся с небес на нашу грешную, но такую родную Землю и начинаем вникать в наземный метод создания карт. Прежде всего запомним, что этот метод предусматривает крупномасштабное картографирование территории. А какие масштабы принято называть крупными? По сложившейся градации – это следующие масштабы топографических карт: 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500, а иногда 1:200 и 1:100. Напомним, что это масштабы соответственно в 1 см – 50 м, 1 см – 20 м, 1 см – 10 м, 1 см – 5 м, 1 см – 2 м и 1 см – 1 м. Чтобы вы ориентировались в назначении перечисленных масштабов, отметим, что карты в масштабе 1:5000, например, служат для составления инженерных проектов строительства крупных городов и промышленных зон. А карты в масштабе 1:500 – для составления генерального плана участков строительства и рабочих чертежей многоэтажной капитальной застройки с густой сетью подземных коммуникаций. В исключительных случаях, когда на небольших участках выполняется сложное инженерное и ландшафтное проектирование шахт, реакторов, электростанций и т.д., связанное с детализацией расположения сложного переплетения надземных и подземных сооружений, топографическую съёмку производят в масштабе 1:100. Представьте себе, что в этом масштабе практически каждый метр местности подлежит измерению.

Как же выполняются эти измерения применительно к наземному методу топографической съёмки? Поехали. В качестве присказки - краткое определение. Под наземной топографической съёмкой понимается комплекс измерительных работ, выполняемых на земной поверхности, по определению взаимного положения точек местности, как в плане, так и по высоте. Слово в плане, как вы догадались, означает определение координат точек, а по высоте - высотных отметок точек над уровнем моря в принятой системе высот. Таким образом, всё сложное, завёрнутое мною выше в хитросплетения заумных слов, сводится к простой фабуле, которую вы немедленно постигнете: субстанцией или объектом измерений являются не сами дома и сооружения, не транспортные коммуникации, не контуры сельскохозяйственных и лесных угодий, а точки, составляющие и характеризующие всё вышеперечисленное. Итак, друзья, вы осознали, что в принципе топографическая съёмка являет собой процесс, связанный, скорее даже, привязанный к измерению координатных и высотных параметров совокупности характерных точек местности.

Суть метода состоит в определении пространственного положения точки местности, т.е. получения, в конечном итоге, координат X , Y и высоты H каждой требуемой точки. Для этого

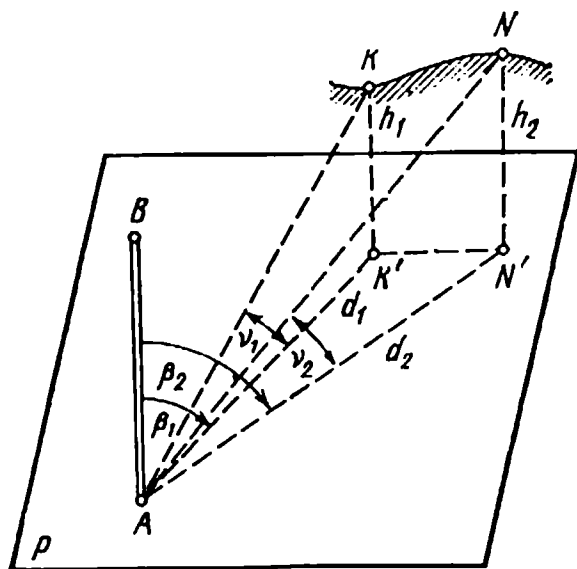


Рис. 36. Тахеометрическая съёмка

измеряем расстояния d от известной точки А до определяемых точек К и N, горизонтальные углы β от исходного направления АВ до направлений на заданные точки К и N и вертикальный угол γ между этим направлениями и горизонтальной плоскостью. Для того, чтобы внести безоговорочную ясность в ваше, друзья, пока ещё не совсем геодезическое подсознание, попрошу вас взглянуть на рис. 36.

На этом рисунке мы видим точки К и N местности, координаты и высоты которых, в конечном итоге, хотим получить. А теперь прошу обратить особое внимание на точки А и В, которые также находятся на местности на некотором отдалении от определяемых точек К и N. Предлагаю сразу договориться, что положение точек А и В на местности известно. Это, действительно, архиважно, как любил писать в своё время вождь мирового пролетариата В. И. Ленин. И это, выражаясь божьим языком, воистину необходимо, поскольку невозможно определить позицию и высоту определяемых (новых) точек без точек старых, которые мы назовём исходными. Эти, так называемые, исходные или стартовые точки характеризуются двумя важнейшими параметрами. Во-первых, их местонахождение известно на местности (они заранее закреплены, скажем, железобетонными столбиками). Во-вторых, их положение определено на карте, так как координаты и высоты этих точек априори, т.е. заранее, известны. Таким образом, направление АВ на местности определено двумя закреплёнными на ней точками А и В. Если, уважаемые коллеги, это понятно, то, как говорят, дальнейшее – дело техники, в нашем случае, дело измерительной техники. Да и в самом деле, нет ничего проще, чем установить на местности, на известной точке А электронный тахеометр и навести его зрительную трубу на отражатель, помещённый над точкой В. А теперь, дамы и господа, вкрапляем в наше мышление немного фантазии, инженерной фантазии, тем самым представляя себе чистый лист бумаги (прообраз будущей карты), на котором нанесена координатная сетка с осями абсцисс x и ординат y . Если координаты точек А и В известны (а чуть выше мы с вами договаривались об этом), то не представляет большого труда нанести эти точки по известным координатам на лист будущей карты. Тем самым, друзья, если не верите себе, то уж, пожалуйста, поверьте мне, что, предварительно соединив эти точки, вы получите на карте (в заданном масштабе) уменьшенное изоб-

ражение линии АВ местности. Это понятно? Очень надеюсь на ваш виртуальный, но утвердительный кивок. В таком случае продолжаем фантазировать. Предположим, что точки К и N - это не просто точки местности, а точки, обозначающие углы здания, т.е. линия KN физически представляет собой фасад дома. Если говорить о позиционировании или, выражаясь более просто, о размещении, то положение точек А, В, К, N на местности известно, я подчёркиваю - известно, мы можем даже пощупать их руками (я имею в виду железобетонные столбики и углы домов, которые олицетворяют эти точки). Продвигаясь дальше, напоминаю вам и, тем самым, снова подчёркиваю, что точки А и В заданы своими известными координатами, и поэтому их положение, заостряю ваше внимание, известно не только на местности, а и на карте. И нет у нас другого выхода, друзья, как немедленно заняться определением положения точек (углов здания) К и N на той же самой карте. Это, собственно говоря, и является нашим намерением в частности и целью рассматриваемой тахеометрической съёмки вообще. А цель эта, коллеги, если мы говорим об измеряемой точке, достигается одним наведением зрительной трубы на эту самую точку. И если мы направляем трубу тахеометра на отражатель, помещённый в точке К (рис. 36), то при этом непременно измеряем горизонтальный угол β_1 , вертикальный угол ν_1 и расстояние d_1 .

А как вычислить по этим измерениям координаты и высоту точки К, уважаемые дамы и господа, вы уже должны знать не хуже меня. И, если кто-то, коллеги, случайно запомнил это, то не сочтите за труд подсмотреть, с моего позволения, формулы (8), (9) из главы 2 и формулы (34), (45) из главы 5. Затем зрительная труба электронного тахеометра наводится на следующую точку N и при необходимости (а такая необходимость в реальной практике имеет место быть практически всегда) ещё на десятки и сотни точек, которые просматриваются с точки А, где установлен тахеометр. Для каждой из этих точек также измеряются горизонтальные и вертикальные углы и расстояния. Только необходимо помнить, что все эти точки не виртуальные и не произвольные, а венчают и характеризуют собой многообразие ситуации и рельефа местности (дороги и мосты, столбы электропередач и колодцы подземных прокладок, ограждения и деревья, вершины холмов и русла рек и т.д. и т.п.). И ещё я хочу акцентировать (акцент, разумеется,

геодезический), что каждый горизонтальный угол β_i состоит из двух направлений: первое – это один из множества различных лучей при поочерёдном наведении на измеряемые точки i (например, на уже рассматриваемые точки K и N) и второе – это общее постоянное или базисное направление AB . Теперь, друзья, становится понятным, почему такой способ съёмки ситуации называется полярным. Да потому, что все наши измерения незримой нитью связаны с полюсом A , от которого фиксируются измеренные расстояния d_i и полярной осью AB , которую я только что назвал базисным направлением и от которой отсчитываются все измеряемые углы β_i . Впрочем, для полной ясности рекомендую вспомнить полярную систему координат (рис. 9), упомянутую в главе 2 данной книги, которую, надеюсь, вы ещё читаете.

Всё вышесказанное приурочено к полевым геодезическим работам (вы, конечно, ещё помните, что в геодезии любую местность называют обобщающим словом поле). Сама карта по данным измерений составляется в кабинетных условиях (в науках о Земле работы, выполняемые за столом в офисе, называются *камеральными*). Вот и настало время, коллеги, поговорить о процессе, который топографы умилительно величают «камералкой». Итак, тахеометр аккуратно уложен в ящик, как правило, жёлтого или красного цвета, а штатив и отражатель упакованы в специальные чехлы. Теперь рабочее место инженера-геодезиста являет письменный стол, за которым он выполняет математическую обработку произведенных измерений, по окончании которой он приступает к составлению топографической карты. Полагаю, друзья, вы ещё не успели позабыть, что мы уже нанесли на лист будущей карты исходные точки A и B по координатам, значения которых нам были заблаговременно известны. И думаю, что вы помните, что мы соединили эти точки, получив на бумаге линию AB . Приложим к этой линии геодезический транспортир. Это специальный, выполненный из органического стекла, круглый транспортир, который составляет одно целое с линейкой, являющейся продолжением линии, соединяющей центр его окружности с нулевым делением. Это позволяет одновременно отмерять от линии AB измеренные горизонтальные углы β_1 и β_2 , а от полюса A – в заданном масштабе измеренные расстояния d_1 и d_2 . По завершению этих несложных манипуляций получаем на бумаге положение точек K и N , что в принципе и являлось целью работы.

В реальной практике, участок местности, покрываемый наземной топографической съёмкой, может быть достаточно протяжённым. Если, например, такая съёмка предназначена для проектирования нового квартала жилищного строительства, то её площадь может составлять, к примеру, 12 гектаров (300×400) метров. В этом случае число известных точек (подобных точкам А и В) может достигать нескольких десятков, а число измеряемых точек - нескольких сотен. Таким образом, в процессе составления карты на листе бумаги будет целый ряд *полярных осей* и *полюсов*, от которых с помощью геодезического транспорта наносятся на будущую карту положения точек, на которые была наведена зрительная труба электронного тахеометра. Вышеописанный технологический процесс приведен исключительно для понимания самой сущности картографирования. Сегодня, в эпоху мобильных телефонов, всемирной паутины интернета и спутниковой навигации, мало кто пользуется при составлении топографической карты транспортом, линейкой и бумагой как таковой. Сегодня, как вы понимаете, компьютеризировано, если не абсолютно всё, то большинство инженерных (и не только) компонентов нашего бытия. Не составляет исключения и процесс создания карты. Да и в самом деле, работая сегодня в поле таким современным многофункциональным прибором, каким является электронный тахеометр, и при этом в офисе пользоваться устаревшими чертёжными принадлежностями, является, если не нонсенсом, то действием, близким к абсурду. А рассказывал я вам о транспорте и линейке только, так сказать, из гуманитарных или даже методических соображений с тем, чтобы вы уяснили принцип и сущность объясняемого. И вы, коллеги, не только уяснили, а ещё и прониклись уважением к непростой работе предыдущих поколений геодезистов, которые, применительно к нашей тематике, при измерениях, допустим, 1000 точек обыкновенным теодолитом должны были 1000 раз записать их в полевой журнал. Затем произвести математическую обработку этого журнала, при этом по 1000 измеренным расстояниям и по 1000 измеренным вертикальным углам следовало вычислить 1000 горизонтальных проложений, 1000 превышений и 1000 высот точек. И далее, как вы уже знаете, необходимо было 1000 раз с помощью транспорта и линейки отложить на карте 1000 измеренных горизонтальных углов и 1000 горизонтальных проложений измеренных рас-

стояний. Сегодня мало кто из выпускников геодезических факультетов университетов видел этот самый полевой журнал. Необходимость записей в нём просто канула в Лету, ведь электронный тахеометр является как накопителем измеренной информации, так и её надёжным хранителем. Кроме того, на дисплее тахеометра имеется возможность видеть все измеренные величины: горизонтальные углы, вертикальные углы и наклонные расстояния. Вместе с тем на том же дисплее высвечиваются вычисленные встроенным в тахеометр компьютером горизонтальные проложения измеренных линий и превышения между точками. Наконец, самое главное: с помощью специального интерфейсного кабеля производится передача всей измерительной информации из электронного тахеометра в персональный офисный компьютер. Посредством специальных программ вся полученная информация сосредотачивается в файле, в котором представлен реестр измеренных точек с их координатами X , Y и высотами H . После нескольких простых операций, практически одним кликом клавиатурной клавиши, уже не на листе бумаги, а на мониторе компьютера появятся точки K , N и ещё тысячи измеренных точек с их номерами и подписанными высотами.

Возникает вопрос, что же делать со всем этим многообразием светящихся точек, подмигивающих нам с компьютерного экрана? Как превратить их в топографическую карту, строительный план или трассу дороги? Для этого, Вы уж простите меня великодушно, я должен переместить Вас из хорошо прокондиционированного или наоборот протопленного офиса в поле, где ярко светит жаркое солнце или где пронизывающий ветер швыряет ледяные снежинки в зрительную трубу тахеометра. Да и не столь важно, друзья, холодно Вам или жарко, сколько существенно не забыть перед началом топографической съёмки сделать схематический чертёж картографируемой местности. Этот чертёж в геодезическом обиходе называют *абрисом* (рис. 37). Вообще говоря, абрис, если верить энциклопедиям, это не что иное, как контур или очертание предмета. В топографии под словом абрис понимается глазомерно составленный чертёж местности, отображающий объекты топографической съёмки (элементы ситуации и рельефа), необходимые для составления карты и ориентирования на местности. В принципе абрис представляет собой сделанный от руки внемасштабный, но с примерным соблюдением про-

зует определённый элемент ситуации или деталь рельефа.

На абрисе (рис. 37) видно, что точка 2 является правым углом Н (нежилого дома), точка 10 - левым углом ЖЖ (двухэтажного жилого дома), точки 6 и 8 - это точки, принадлежащие ограде (на абрисе ограда показана своим условным знаком) между этими домами. Следующее действие - это отыскать эти точки на компьютерном мониторе и посредством мыши того же компьютера соединить эти точки прямой линией. И тогда вам уже нет необходимости сегодня применять архаичную линейку или патриархальный транспортир, или какие-то особые усилия, чтобы получить с помощью нескольких компьютерных кликов и линию забора, и углы двух домов на экране вашего персонального компьютера. Или точно также, соединяя поочерёдно точки 67, 58 и точки 69, 57, 49, мы полу-

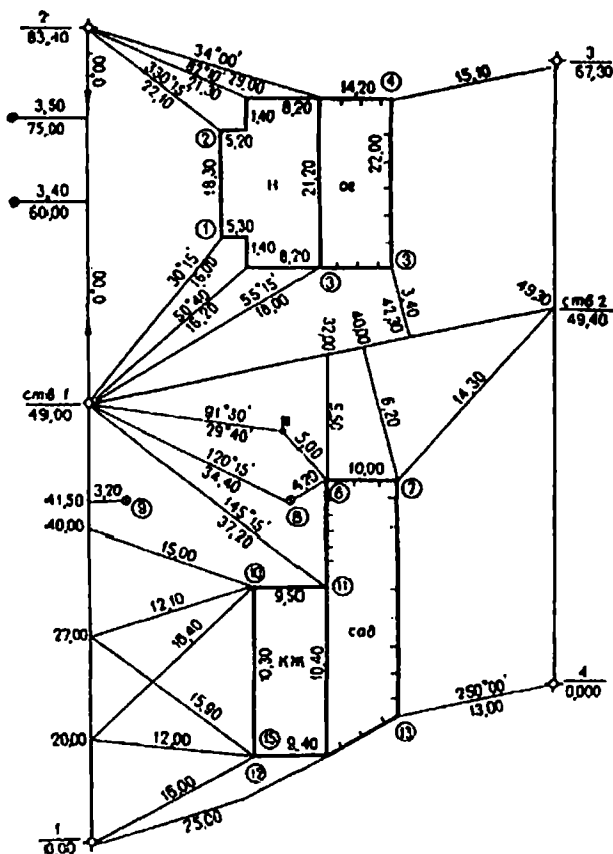


Рис. 38. Абрис топографической съёмки

чим противоположные края проезжей части дороги по ул. Тимирязева. На абрисе (рис. 38) отмечен, например, Н - нежилой дом (точки 1 и 2) и КЖ - каменный жилой дом (точки 10 и 12). Отыскав, по подобию предыдущего примера, эти точки на мониторе и проводя между ними отрезки линий, получаем в заданном масштабе линии фасадов этих домов. Внимательно вглядываясь в пронумерованные точки абриса и находя под теми же номерами точки на компьютерном дисплее, остаётся в соответствии с абрисом соединить точки, принадлежащие искомому контуру или линии местности. В результате получаем то, что одним словом называется *ситуацией*, т.е. очертания лесов или парков, сельскохозяйственных угодий и ограждений, тропинок, дорог и магистралей, контуры существующей застройки, благоустройства и трасс подземных и надземных коммуникаций. Казалось бы, конец - делу венец. Но не тут-то было. Чего-то всё-таки не хватает. Для полноты картины, которую мы через несколько мгновений назовём полноценной картой, необходимо отобразить на ней *рельеф*. В противном случае, зачем же мы тогда измеряли вертикальные углы, вычисляли превышения и высоты каждой из измеряемых точек. Числовые значения этих высот, подписанные возле каждой точки, допризывно подмигивают нам с экрана персонального компьютера. Допризывно потому, что как бы ненавязчиво приглашают нас совершить с их помощью какое-то действие. А действие это называется *рисовкой рельефа*. Производится такая рисовка посредством горизонталей (см. главу 3). После этого, коллеги, нам остаётся только завершить компьютерное вычерчивание, заняться оформительской и редакционной косметикой и, наконец, навести компьютерную мышь на заставку "print" с тем, чтобы напечатать первый экземпляр карты участка местности, с которого, выражаясь высоким слогом, мы смыли ещё одно "белое пятно". Небольшой фрагмент такой карты приведен на рис. 39.

Ну, вот и всё, уважаемые мадам и месье, кажется, приехали. Приехали с тем, чтобы двигаться дальше, предвкушая по пути, как напевал замечательный бард Юрий Визбор, "то взлёт, то посадку". Посадку, коллеги, мы уже совершили в том смысле, что более чем детально разобрались в принципах наземной топографической съёмки, осуществляемой на поверхности земли. А теперь нам предстоит взлететь на высоту, по крайней мере, птичьего полёта, чтобы вникнуть в сущность аэро-

6) привязка материалов фотосъемки к фиксированным точкам (точки опорной геодезической сети);

7) камеральные работы по обработке аэрофотоснимка для изготовления карты.

Как видите, процесс, в самом деле, не простой, и чтобы этот, как говорил первый и последний президент незабвенного СССР М.С. Горбачёв, "процесс пошёл", мне понадобится как минимум семестр университетского времени. Этого времени нет как у меня, так, разумеется, и у вас. Да и цель этой книги, коллеги, ввести вас в специальность, а не превратить ваш мыслительный аппарат в мусорный ящик, где собирается избыточная и никому не нужная информация. Так что, друзья, постараюсь быть предельно и в то же время последовательно кратким, конечно же, не в ущерб вашему пониманию сущности аэрофотосъемки.

Итак, дамы и господа, прошу застегнуть привязные ремни, мы взлетаем. Упаси вас бог подумать, что вы находитесь в каком-нибудь бизнес классе сверхскоростного пассажирского лайнера. Вы летите на небольшом, вовсе не комфортабельном самолёте, на высоте, предположим, 2–5 км со средней скоростью 300 км/ч. В процессе полёта фотографирование местности производится с помощью специальных аналоговых или цифровых фотокамер, установленных на борту самолёта. При выполнении аэрофотосъемки для картографических целей стремятся придать снимкам горизонтальное положение, т.е. придать оптической оси фотоаппарата отвесное положение. Аэрофотосъемка называется *маршрутной*, когда полоса местности фотографируется с одного захода самолёта. При аэрофотосъемке обширных участков земной поверхности прокладываются несколько прямолинейных и взаимно параллельных маршрутов, в этом случае аэрофотосъемку называют *площадной*. Фотографирование местности осуществляется через определённые интервалы времени с таким расчётом, чтобы аэрофотоснимки перекрывали друг друга. Это значит, что на каждом следующем аэрофотоснимке частично изображается площадь, полученная на предыдущем (рис. 40).

Перекрытие двух смежных снимков в одном маршруте называют *продольным перекрытием* аэрофотоснимков, оно составляет не менее 60% от размера снимка. Расстояние между маршрутами устанавливают таким образом, чтобы между снимками соседних маршрутов тоже получилось перекрытие, только

уже *перекрытие поперечное*, которое должно быть не менее 30%. Продольные и поперечные перекрытия необходимы для связи аэрофотоснимков в общую систему при их фотограмметрической обработке для составления карты. А ещё перекрытие снимков непременно используется для создания стереомодели местности при рисовке рельефа на аэрофотоснимке, что будет рассмотрено ниже.

По завершении полёта мы снова опускаемся на землю. Но наша работа на этом не заканчивается. Начинается знакомый нам с детства (тем, чья юность захватила 60–70 годы прошлого столетия) процесс проявления и закрепления полученных негативов и контактной печати с последующим изготовлением позитивов, т.е. искомого аэрофотоснимка. Фотолабораторный процесс завершается производством *накидного монтажа*, который представляет собой соединение аэрофотоснимков по одноименным контурам в одну сплошную картину заснятой местности.

Для более полного понимания дальнейшего преобразования аэрофотоснимка в карту, должен сделать одно небольшое, и далеко не лирическое, отступление. Прежде всего, необходимо, пользуясь ненормативной лексикой, «зарубить» себе на носу, что аэрофотоснимок и карта одного и того же участка местности отнюдь не тождественные понятия, несмотря на то, что изображают одну и ту же территорию. Любой школьник,

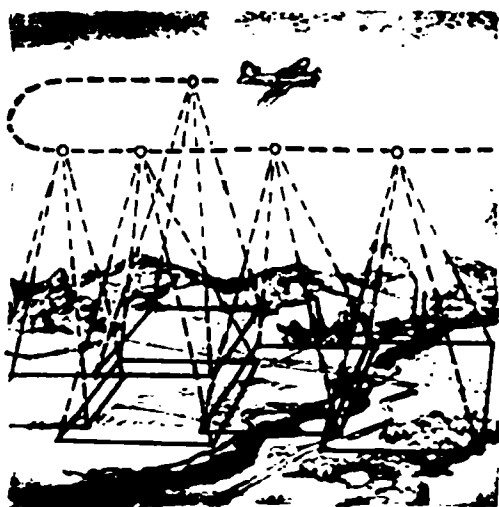


Рис. 40. Продольное и поперечное перекрытие аэрофотоснимков

рассматривая аэрофотоснимок и карту, скажет, что последняя более удобочитаемая и более информативная. На карте, например, можно увидеть названия деревень, рек и городских улиц, породу и высоту деревьев в лесу, этажность строений, материал покрытий дорог и т.д. и т.п. Всем понятно, что аэрофотоснимок отличается от карты и по внешнему виду: если карта является достаточно точным чертежом местности, то аэрофотоснимок представляет её фотоизображение. Однако принципиальное отличие карты от аэрофотоснимка состоит в математике, а точнее, в геометрии их получения (рис. 41).

Карта есть не что иное, как *ортогональная проекция* местности. Переводя вышесказанное на обиходный язык, надо понимать, что карта (плоскость) параллельна местности, которая ортогонально проектируется посредством перпендикуляров на эту плоскость. В основании этих перпендикуляров и размещается то, что мы называем картой (рис. 41, а). Другая картина (возможно, поэтому плоскость снимка называют картинной) получается на аэрофотоснимках, на которых изображение объектов местности строится проектирующими лучами, пересекающимися в точке S объектива аэрофотоаппарата. Именно такими лучами на снимке и получено изображение ab линии AB местности в *центральной проекции* (рис. 41, б). Плоскость снимка принято называть *картинной* (собственно здесь мы и получаем фотоизображение), а оригинал или поверхность

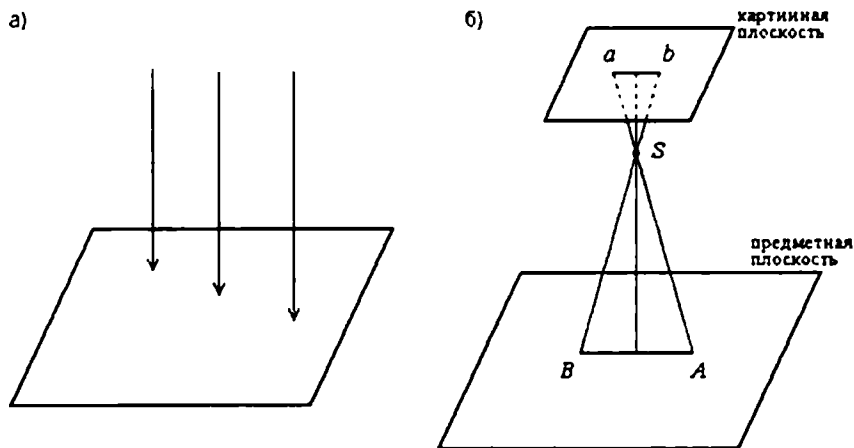


Рис. 41. Проекции:
а) ортогональная; б) центральная

стоянии объектива фотокамеры $f_k = 100$ мм, необходимо получить масштаб аэрофотоснимка $\frac{1}{M} = \frac{1}{30,000}$. Подставляя исходные данные в формулу (47), получим

$$H = M \cdot f_k = 30000 \cdot 0,1 \text{ м} = 3000 \text{ м} \quad (48)$$

Все вышеприведенные формулы и расчёты правильны только в том случае, когда оптическая ось фотокамеры вертикальна, т.е. занимает отвесное положение. На практике допускаются небольшие отклонения оси камеры от вертикального положения (до 3°). Только в этом случае центральная проекция аэрофотоснимка будет фактически тождественна ортогональной проекции карты. Если при производстве аэрофотосъёмки ось фотокамеры наклонена к вертикали под некоторым углом $\alpha > 3^\circ$, то, так называемая, *плановая* аэрофотосъёмка превращается в аэрофотосъёмку *перспективную*. Для полной ясности несколько слов о плане и о перспективе. При плановой аэрофотосъёмке, ещё раз повторяю, камера направлена вертикально вниз под прямым углом к поверхности земли. При этом на аэрофотоснимке мы наблюдаем плоскостное изображение (по сути, упомянутую ранее ортогональную проекцию), практически не отличающееся от карты. Так, при производстве плановой аэрофотосъёмки на снимке видны только крыши фотографируемых домов. При перспективной (обзорной) аэрофотосъёмке, когда камера направлена под углом к горизонту, мы видим объёмное изображение, т.е. не только крыши сооружений, но и их боковые поверхности. Когда местность изображается в перспективе, то масштаб этого изображения из постоянной величины превращается в величину переменную, т.е. полученный снимок будет иметь в каждой своей точке разный масштаб, что и показано на рис. 42, б. Итак, дамы и господа, надеюсь, вы поняли, что у нас есть проблема с масштабом перспективной аэрофотосъёмки, даже не столько с самим масштабом, сколько с разномасштабностью одного и того же аэрофотоснимка.

Но этим наша проблематика не исчерпывается. К сожалению, при переходе от снимка к карте есть ещё одно затруднение, которое необходимо преодолеть: это *смещение* в положении точек на снимке, вызываемое рельефом местности.

Давайте, друзья, взглянем вместе на рис. 43. На нём точка A представляет собой вершину горы, а точка A_0 находится с точкой A на одной отвесной линии, т.е. является проекцией этой вершины на горизонтальную плоскость. А если вы, коллеги, позволите себе прервать чтение этого предложения и вернуться в начало этой книги (глава II, рис. 15), то, несомненно, вспомните, что именно горизонтальная проекция является элементом карты, а в нашем случае - аэрофотоснимка. В таком случае совсем нетрудно догадаться, что на нашем аэрофотоснимке (рис. 43) мы вместо изображения a_0 точки A_0 получим изображение a точки A .

Отрезок aa_0 и является линейным смещением (искажением) точки a_0 , обусловленным влиянием рельефа местности.

Попробуем, леди и джентльмены, ещё раз обнажить проблемы, которые мы с вами обсудили. В конечном итоге, мы пришли к выводу, что угол наклона камеры при аэрофотосъёмке и рельеф местности ощутимо влияют на изображение на аэрофотоснимке, внося в него соответствующие *искажения*. Свести эти искажения к минимуму позволяет процесс, который называется *трансформированием аэрофотоснимка*. В классической фотограмметрии под трансформированием понимается преобразование центральной проекции, которую представляет собой аэрофотоснимок, полученный при наклонной проекции главного луча в другую центральную проекцию, соответствующую отвесному его положению, с одновременным приведением изображения к заданному масштабу. А те-

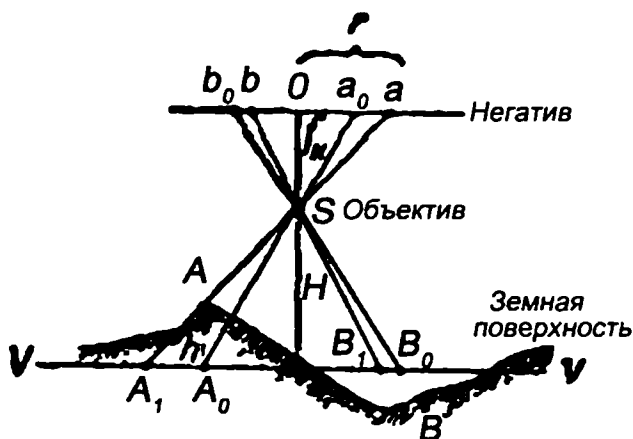


Рис. 43. Смещение изображения точки на аэрофотоснимке из-за рельефа местности

перь, коллеги, возлагаю на себя миссию прокомментировать эту, возможно, не всем понятную формулировку. По сути дела, трансформирование представляет собой, с одной стороны, целенаправленное изменение геометрических свойств аэрофотоснимка с благородной целью преобразования его в заданную проекцию, в которой масштаб снимка будет постоянным. С другой стороны, трансформирование - это процесс преобразования снимков из наклонных в горизонтальные. Прибор, с помощью которого производится трансформирование, называется фототрансформатором (рис. 44).

Фототрансформатор состоит из проекционного фонаря с источником света, объектива, кассеты и экрана, на который проектируется трансформируемый снимок.

Для понимания принципа работы фототрансформатора необходимо вернуться на несколько страниц назад, где говорилось о технологии производства аэрофотосъемки и упоминалось о привязке материалов аэрофотосъемки к фиксированным точкам местности. Эти фиксированные точки в фотограмметрии называют *опознаками*. В сущности опознак - это точка на аэрофотоснимке, опознанная с идентичной точкой местности, координаты и высота которой заведомо известны (технология измерения и получение координат и высот таких точек будет рассмотрена в следующей главе).

Возвращаемся снова к фототрансформатору, чтобы понять, как производится процесс трансформирования на этом приборе. Думаю, что не очень сложно. В кассету фототрансфор-

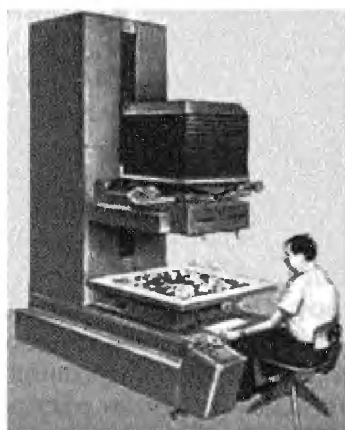


Рис. 44. Фототрансформатор

матора закладывается аэронегатив, а на экране размещается планшет (чертёжная бумага). На этой бумаге по известным координатам в выбранном масштабе наносятся четыре опознака, о сущности и назначении которых мы только что говорили. Эти же точки проколоты на аэрофотонегативе в виде кружков диаметром 0,2 мм. При включённом осветителе указанные точки на негативе проектируются кружками на планшет экрана. Затем поворотом рукояток и ножных штурвалов фототрансформатора и негатив, и объектив, и экран перемещаются так, чтобы изображение было чётким, а световые пятна намеченных на негативе точек совместились с их положением на планшете. Вот и вся музыка, друзья. Единственное, что осталось сделать, так это выполнить фотографирование на фотоплёнку или фотобумагу при совмещённом положении заданных точек. После этой процедуры мы облегчённо вздыхаем и получаем трансформированный негатив или фотоснимок, во всех частях которого будет один и тот же масштаб, что, собственно, и требовалось доказать.

И ещё один небольшой, но весьма существенный комментарий. Для трансформирования снимка на нём следует иметь четыре трансформационные точки с известными координатами. В реальной работе как с технологической, так и с экономической точки зрения нецелесообразно, да и, откровенно говоря, нерентабельно обеспечивать каждый снимок такими точками. Ведь при аэрофотосъёмке значительной площади можно получить десятки аэрофотоснимков и, таким образом, потребуется большой объём полевых работ для определения координат точек, которые после измерительных и вычислительных работ получают статус известных точек (см. следующую главу). Это увеличивает как объём работы, так и её стоимость. На практике, на местности измеряются только 4–6 точек на весь маршрут полёта. А положение остальных десятков или даже сотен точек (ведь никто не отменял наличия на каждом снимке заданного маршрута 4 трансформационных точек) определяется в камеральных (офисных) условиях. Необходимо ещё раз подчеркнуть, что если полётный маршрут охватывает, к примеру, 15 аэрофотоснимков, то на местности полевыми измерениями определяются координаты 4 точек, а положение остальных 28 точек выполняется камеральными методами (в офисе). Один из самых распространённых методов создания таких 28 точек получил название *фототриангуля-*

ция. Вообще-то, углубление в тонкости производства фототриангуляции выходит за рамки вводного курса. Тем не менее, желательно знать, что фототриангуляция представляет собой метод определения положения трансформационных точек путём измерений аэрофотоснимков на специальных фотограмметрических приборах. Ещё раз отметим, что измерения для определения координат этих точек осуществляются не "в поле" (не на местности), а "в камералке" (в офисе).

После трансформирования составляют план местности, который называют *фотопланом*, который являет собой фотографически уменьшенное изображение предметов и контуров местности. Однако по разным причинам далеко не все ситуационные элементы местности могут быть легко опознаны на аэрофотоснимке. Действительно, на местности существуют объекты, которые трудно различить на снимке, например, подземные коммуникации, небольшие мосты, дорожные трубы, колодцы и т.д. Кроме того ряд элементов будущей карты вообще не может быть получен на аэрофотоснимке. К таким элементам, прежде всего, относятся географические названия, числовые характеристики, административные границы. Процесс распознавания на фотоизображении объектов местности, которые в последующем подлежат нанесению на карту, выявления их границ, качественных и количественных характеристик, а также вычерчивания полученных результатов условными знаками называется *дешифрированием*. Сводя приведенное определение в короткую фразу, можно сказать, что дешифрирование есть не что иное, как опознание объекта местности на аэрофотоснимке. Дешифрирование бывает полевым, когда ситуация распознаётся с выходом на местность при полевом обследовании, т.е. сличением аэрофотоснимка с натурой. Оно может быть и камеральным, когда по характерным признакам фотоизображения, объекты местности опознаются без обследования в натуре. При камеральном дешифрировании пользуются альбомами эталонов. Сравнивая изображение на дешифрируемом снимке и эталоне, по аналогии опознают тот или иной объект. Основными дешифровочными признаками являются: формы и размеры объекта, тон и структура изображения, тень, отбрасываемая объектом, взаимная связь в расположении отдельных элементов ситуации. Вот, пожалуй, и всё, не углубляясь в теорию и практику самого процесса, что я хотел сказать вам, коллеги, о дешифрировании. Главное, что вы поняли, по какой

причине возникает задача дешифрирования аэрофотоснимков и общие принципы реализации этой задачи. Важно только помнить, что дешифрирование – это важная и ответственная часть аэрофотогеодезических работ. Ведь от точности определения положения на фотоизображении дешифрируемых элементов зависит достоверность и качество информации, получаемой по фотоснимкам.

Если вы, уважаемые леди и джентльмены, устали от напряжённого изложения этой аэрофотосъёмочной главы и, грешным делом, подумали, что я приближаюсь к её завершению, то спешу вас обрадовать в правильном направлении ваших утомлённых умозаключений. Мы, может быть, медленно, но, тем не менее, достаточно уверенно приближаемся к завершению аэрофотогеодезического способа создания карты. Итак, друзья, отвечая на вопрос классика, "что я могу ещё сказать?", хочу чуть ли не торжественно заявить, что в результате перечисленных мною выше различных фотограмметрических манипуляций контурную или ситуационную часть карты мы уже практически получили. И ещё, пусть менее торжественно, хочу заявить, что осталась нам самая малость: каким-то образом преобразовать эту *ситуационную карту в карту топографическую*. И что для этого необходимо предпринять? Вы, уважаемые коллеги, уже располагаете достаточными базисными знаниями, чтобы ответить, что для достижения обозначенного следует каким-то образом на аэрофотоснимке отобразить *рельеф местности*. Но каким образом?

Начинаем разбираться. Не секрет, что на топографической карте рельеф изображается с помощью горизонталей. Но для рисовки горизонталей необходимо знать высоты точек окружающей местности. Понятно, что внутри самолётного аэрофотоаппарата не сидит дядя, который смог бы записывать высоты фотографируемой местности. Однако вычертить горизонтали без знания высот соответствующих точек невозможно. И снова классика: "что делать?" На этот излюбленный вопрос русской интеллигенции ответ даёт метод **стереотопографической съёмки**, с которым я вас немедленно познакомлю. Вообще говоря, это основной метод создания топографических карт, складывающийся из аэрофотосъёмки, полевых и камеральных топографических работ. Полевые работы, как указывалось, заключаются в определении планового и высотного положения зафиксированных при аэрофотосъёмке избранных

точек местности путём наземных измерений и полёвом маршрутным дешифрированием аэрофотоснимков. Камеральные работы включают трансформирование аэрофотоснимка, фототриангуляцию (сгущение упомянутых избранных точек местности), камеральное дешифрирование и (это мы ещё не проходили) стереоскопическую рисовку рельефа, которая основана на принципе *стереоскопического эффекта*. Эффект заключается в восприятии окружающих предметов не в плоскостном, а в объёмном изображении. Он возникает вследствие наблюдения объекта под разными ракурсами правым и левым глазом. Это свойство наших глаз и используется в стереотопографической съёмке. Нам уже известно из предыдущего изложения, что два соседних снимка, сделанные из летящего самолёта, перекрываются один другим, и тогда на каждом из них частично изображается один и тот же участок местности. Эти снимки закладываются в специальные фотограмметрические приборы (рис. 45), стереометр или стереограф, и рассматриваются совместно (один снимок - левым глазом, а другой - правым). При этом оба снимка сливаются в одно чёткое изображение, а местность, сфотографированная на них, предстаёт перед нами в объёмной картине. Такое рельефное изображение снятой местности мы называем *стереоскопической моделью*. Эта модель посредством стереометра позволяет определить высоты точек местности.

Происходит это по следующей технологической схеме (для простоты и доступности изложения я позволю себе опустить



Рис. 45. Топографический стереометр

технические детали). В поле зрения стереометра вместе с объёмным изображением местности видна, так называемая, пространственная марка, представляющая собой небольшую чёрную точку. Вращая регулирующие винты прибора, можно менять положение этой марки относительно рассматриваемой стереомодели. А теперь представьте себя, уважаемые коллеги, в роли оператора-топографа. Напряжённо вглядываясь в окуляры прибора, вы видите трёхмерное изображение реальной местности, над которой, предположим, несколько часов назад пролетал самолёт с аэрофотоаппаратом на борту. Вы видите практически подлинную местность с контурами лесов и полей, с прожилками рек и изрезанной линией оврагов, с горными вершинами, с волнистыми очертаниями хребтов и седловин. Перемещая марку стереометра по этой прекрасной панораме, легко убедиться, что она то будет находиться над поверхностью рассматриваемой стереомодели, то как бы пронизывать иллюзорную земную поверхность. Задача оператора, удерживая марку на поверхности стереомодели, передвигать её таким образом, чтобы она касалась мест, находящихся на одной и той же высоте. И тогда карандаш прибора, связанный с механизмом перемещения марки, вычертит горизонталь, которая, если вы помните, является линией равных высот. Затем на специальной шкале стереометра выставляется отсчёт, соответствующий следующей горизонтали. Вследствие этого действия марка поднимется или опустится на высоту сечения рельефа (разность высот между горизонталями), и карандаш вычертит следующую горизонталь. Продолжая работать по приведенной схеме, в конечном итоге, получаем на фотоизображении рельеф местности, что, собственно говоря, и являлось нашей целью на пути создания топографической карты.

Прежде чем завершить этот непростой трудоёмкий и, можно сказать, тернистый путь, давайте, уважаемые дамы и господа, перечислим составляющие нашей нелёгкой дороги к получению её величества карты (рис. 46).

Стало быть, наш специально оборудованный самолёт набрал высоту с тем, чтобы, пролетая над заданным участком местности, по определённой технологии через равные промежутки сфотографировать его. А технология эта в основном заключается в обеспечении перекрытия следующих друг за другом снимков с целью в последующем создать стереоизоб-

ражение фотографируемой местности. Полученные снимки не могут ассоциироваться с картой из-за возникающих в них по разным причинам геометрических несоответствий (искажений). Устраняются эти искажения методами *фотограмметрии*. Первым шагом приближения аэрофотоснимка к карте является преобразование центральной проекции аэрофотоснимка в орто-

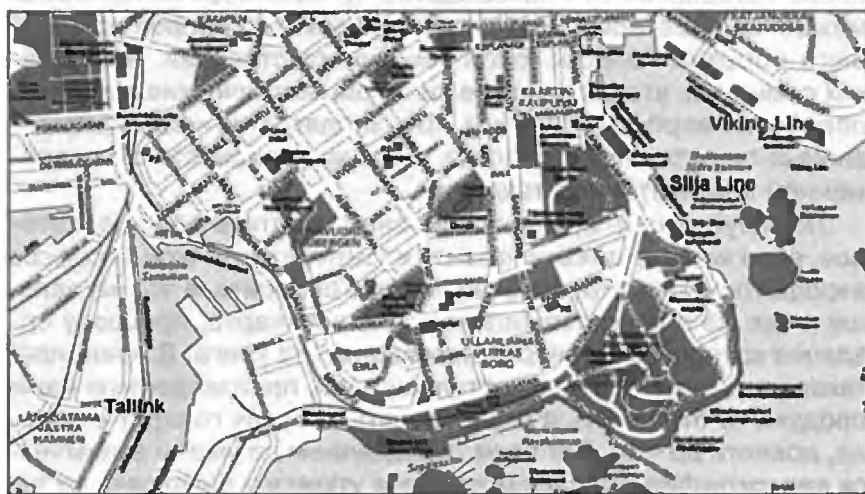


Рис. 46. Аэрофотоснимек и карта

гональную проекцию, т.е. в проекцию, в которой, собственно, и составлена карта. Это достигается процессом *трансформирования*, которому подвергаются аэрофотоснимки. В сущности, трансформирование аэрофотоснимка заключается в совмещении на специальном приборе точек местности с известными координатами, которые сфотографированы на снимке с этими же точками, заранее помещёнными в заданную координатную систему. Положение части этих точек определяется непосредственными измерениями на местности, но в основном координаты этих точек получают на специальных фотограмметрических приборах методом фототриангуляции. Поскольку не все элементы ситуации могут быть опознаны на аэрофотоснимке, последний подвергается процессу дешифрирования, процессу распознавания объектов местности, которые в последующем подлежат нанесению на карту. По завершению всех этих действий становится ясным, что на аэрофотоснимке отсутствует третье измерение, измерение высот, которые являются основой для вычерчивания рельефа на картах. Используя методы *стереофотограмметрии*, посредством специальных стереоприборов выполняют проведение горизонталей, которые, собственно говоря, и являются носителями рельефа на аэрофотоснимке. В заключение необходимо отметить, что сугубо в методических целях, для логического и полного понимания фотограмметрических процедур, объяснение технологии их производства приводилось на примерах механических стереофотограмметрических приборов устаревшего образца 70–80-х годов минувшего столетия. Нет никаких сомнений, что сегодня все фотограмметрические процессы обработки аэрофотоснимков производятся на модернизированных электронных приборах с применением самой современной компьютерной техники.

Пожалуй, коллеги, я закончил своё короткое резюме, которое, если хотите, можете назвать визитной карточкой процесса аэрофотосъёмки. Вы, конечно, вправе спросить, а что же дальше и где же в конце-концов вожделённая карта, процессу создания которой фактически посвящена эта книга. В принципе, такая карта уже создана, осталось лишь произведенную нами продукцию отутюжить и отшлифовать или, как говорят в народе, довести до ума. Вот этим "доведением до ума" и занимается *картография*. На самом деле эта утюжка и шлифовка не такое простое дело, как кажется непосвящённым. Перед тем, как

запустить карту в массовый тираж и напечатать её, картографы запускают в действие технологическую цепочку, которую называют *картосоставительским процессом*. Он включает в себя: редакционно-подготовительные, составительские и оформительские работы. Предлагаю вам, уважаемые коллеги, для полноты восприятия картосоставления, вместе со мной проследить за ходом выполнения этого процесса.

Начнём с *редакционно-подготовительных работ*: они включают в себя сбор, обобщение и систематизацию картографических источников, изготовление макета карты, выбор масштаба, картографической проекции, способа изображения и условных обозначений. Это довольно сложный комплекс многофакторных работ, которые предстоит произвести картографу на пути преобразования уже прошедших камеральную обработку аэрофотоснимков в карту. И это далеко не всё, ещё ведь предстоит рассчитать параметры картографической проекции, построить сетки географических и прямоугольных координат, нанести опорные геодезические пункты и выполнить монтаж собранного картографического материала.

Затем выполняются *составительские работы*, основным процессом которых является генерализация картографического изображения. Под термином генерализация понимается процесс отбора и обобщения элементов упомянутого картографического изображения. По окончании этих работ выпускается оригинал карты, который по аналогии с одноименными работами тоже называется составительским. Законченный составительский оригинал тщательно редактируется и корректируется. Этот оригинал карты по своей сути является авторским, и поэтому по своему графическому качеству не отвечает требованиям издания карт.

Оформительские работы производят уже на издательском оригинале карты, который ещё вчера производился вычерчиванием на бумажной или пластмассовой основе, а сегодня выполняется с привлечением современных компьютерных технологий.

Всё, дорогие читатели, я ставлю маленькую точку, почему маленькую, а не большую и жирную, вы узнаете в следующей главе. Эта маленькая точка символизирует благополучное завершение нашего геодезического паломничества от взлёта аэрофотосъёмочного самолёта до изготовления издательского оригинала карты. Это, так называемое, паломничество в

общем виде показано на рис. 47, который я позаимствовал из замечательной книги А. М. Куприна "Слово о карте".

Через некоторое время издательский оригинал попадёт в типографию, и по окончании полиграфических работ у нас в руках окажется выпущенный на качественной мелованной бумаге, ещё пахнущий типографской краской, колоритный экземпляр карты местности, над которой совсем недавно пролетал самолёт. Сегодня запах типографской краски уже канул в Лету, карты уже не пахнут полиграфией, техническая революция и современные технологии трансформировали бумажные карты в электронные. Сегодня можно видеть эти карты на экранах спутниковых навигаторов GPS и мобильных телефонов. Сегодня, никого не спрашивая, можно зайти в интернетовский сайт Google Maps, найти интересующую вас карту и передвижением компьютерной мышки проложить, например, маршрут запланированного путешествия, а если понадобится, одним кликом всё той же мышки вывести карту или её фрагменты на печать. Как бы там ни было, картография, представленная в

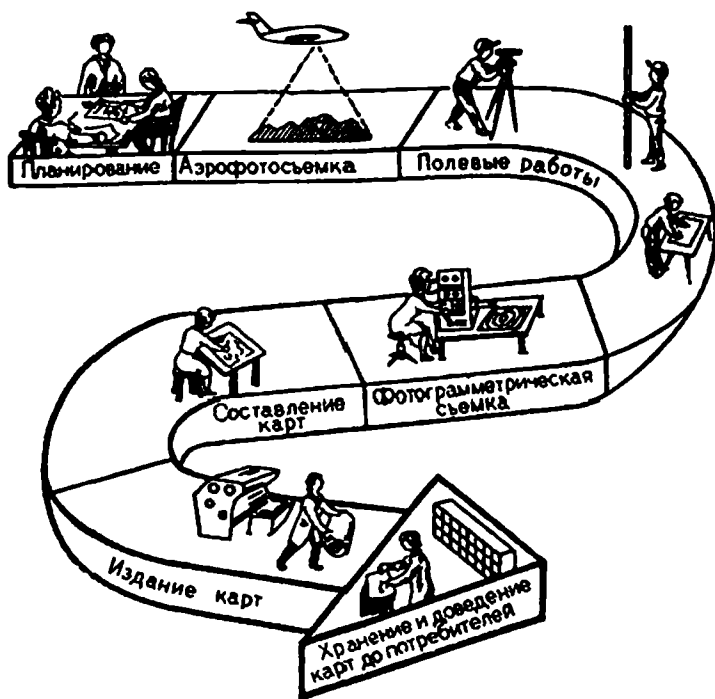


Рис. 47. Этапы создания карты

электронном виде во всех этих навигаторах, мобильных и ноутбуках, родилась в геодезической среде и производилась методами наземной топографической съёмки или методами аэрофотосъёмки, которые изучены в этой главе.

ГЛАВА 7

ФУНДАМЕНТ КАРТЫ, ИЛИ ОПОРНЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ СЕТИ

**Что такое опорная геодезическая
сеть. Методы создания плановой
геодезической опоры.
Методы создания высотной
геодезической опоры**

*На живописные просторы
Не устаём в трубу смотреть.
Нужна нам в качестве опоры
Для карты нашей - геосеть.*

Перед тем, уважаемые дамы и господа, как вы начнёте читать эту, я бы сказал, опорную главу, убедительно прошу взглянуть вас в зеркало. И тогда, разглядывая свои симпатичные и милые лица, вы обязательно увидите на них в зеркальном отражении удовлетворённую улыбку, которая означает, что проблема, поставленная в этой книге, *практически* решена. Вы, милостивые коллеги, путешествуя по страницам этого геодезического опуса, *практически* постигли, как реализуется магистральная и доминирующая задача геодезии - создание топографической карты.

Выделяя в предыдущих предложениях слово "практически" курсивом, я, друзья, намекаю вам, что имеется у нас таинственное "нечто", которое не позволяет мне поставить точку для завершения процесса создания карты. Если уже быть до конца откровенным, то я, будем считать в методических целях, не удосужился познакомить вас с существенным и, если хотите,

ключевым звеном в технологической цепочке формирования карты. Именно с этого звена и начинается её составление.

Однако обо всём по порядку. Говорят, настоящее зиждется на прошлом. Если так, то прошу вас, леди и джентльмены, не счесть за труд заглянуть в не такое уже и далёкое прошлое, прошу вас всего-навсего задержать свой взгляд на рис. 36, размещённый в тексте предыдущей главы. Этот рисунок иллюстрирует полярный метод наземной топографической съёмки. На нём точки А и В, которые формируют основное или ориентирующее направление АВ, необходимое для производства, в данном случае, тахеометрической съёмки, названы словами стартовые, исходные, известные точки. А ещё в предыдущей главе при описании процесса трансформирования аэрофотоснимков говорилось об опознаках, которые определены как известные и фиксированные на местности точки. Откуда же берутся на местности эти известные точки, кто определяет их координаты и высоты?



Рис. 48. Геодезический знак

Чтобы ответить на этот непростой вопрос, предлагаю снова занять свои места в нашем фирменном поезде "геодезия", который продолжает своё движение по топографической трассе. Он стремительно проносится мимо малахитовых равнин и бурых холмов, привольных степей и желтоватых пустынь, гигантских мегаполисов и небольших деревенок. Семафоры приветливо подмигивают нам зелёным светом, ненавязчиво намекая, что до конечной станции совсем близко. Неожиданно наш виртуальный эшелон делает остановку на маленьком полустанке. В открытые окна любопытно заглядывают раскидистые ветви широколистных деревьев. А на лесной опушке мы замечаем возвышающуюся над этими деревьями вышку (рис. 48). Это не просто вышка, не буровая вышка и не пожарная каланча, её называют **тригонометрическим** или **геодезическим знаком** или **геодезическим сигналом**. Сигнализирует эта вышка, образно говоря, о том, что её **центр** (рис. 49), определён точными координатами X и Y и высотой H .

Многие полагают, что в неразрывной связке "геодезический знак - центр знака" главенствующим является слово "знак". А почему бы и нет? Ведь именно наружный геодезический знак представляет собой сложное и массивное сооружение, построенное, как правило, в виде простых или сложных (усечённых) металлических или деревянных пирамид, высотой от 3 до 30 и более метров. Геодезический знак является визирной целью для измерений, производимых с других таких же знаков (более подробно поговорим об этом позже). Но прежде всего геодезический знак призван обозначить своё положение на местности с тем, чтобы его можно было отыскать. Другими словами, геодезический знак являет собой наземную часть айсберга, в то время как основная его часть в виде центра (рис. 49) находится под землёй. Стандартный центр гео-



Рис. 49. Центр геодезического знака

дезического знака - это железобетонный пилон (столб), основание которого закрепляют якорным устройством и закладывают на глубину 1,5–3 и более метров ниже границы промерзания грунта. К верхней части этого пилона устанавливают на цементном растворе или приваривают к металлической трубе чугунную *марку*, на сферической поверхности которой имеется *метка* диаметром 2 мм. Когда говорится об известных координатах X , Y и высоте H некоторой точки A на местности, то это самое отверстие и будет являться этой самой точкой A , которая собственно и является *носителем* этих самых координат X_A , Y_A и высоты H_A . В приведенной связке "знак и его центр" геодезическим пунктом или пунктом геодезической сети является центр знака, так как именно к нему, а не к вышке приурочены координаты и высота геодезического пункта. На застроенных территориях (жилая и промышленная зоны городов и посёлков) пункты геодезической сети могут обозначаться металлическими штырями, стержнями и болтами, которые закрепляются цементным раствором в бетонные основания различных сооружений или участки с твёрдым покрытием поверхности земли (асфальт, между бордюрными пилонами дорожных обочин, тротуаров и т.д.). В этом случае нет необходимости строить наружные геодезические знаки, так как расстояния между ними, как правило, не превышают 200 метров, и видимость между пунктами, необходимая для измерений, обеспечивается с поверхности земли.

Что же, собственно, представляет собой **опорная геодезическая сеть**? К сожалению, без формулировки или, как говорят уважаемые профессора и доценты, без определения здесь не обойтись. Да и оно, кстати, совсем не сложное, запоминайте, а ещё лучше, схватывайте и постигайте. Опорной геодезической сетью называется система закреплённых на местности геодезических пунктов, известное плановое (координаты X , Y) и высотное (высота H) положение которых служит основой для топографических съёмок и других геодезических измерений. А теперь представьте себе, что вам необходимо изготовить топографическую карту крупного масштаба для проектирования строящегося жилого дома. Для этой цели, как вам известно, выполняется наземная съёмка. Какой участок площади вместе с элементами благоустройства занимает жилой дом? Пусть габариты этого участка определяются размерами 50х50 м. Перед началом съёмки необходимо найти на мест-

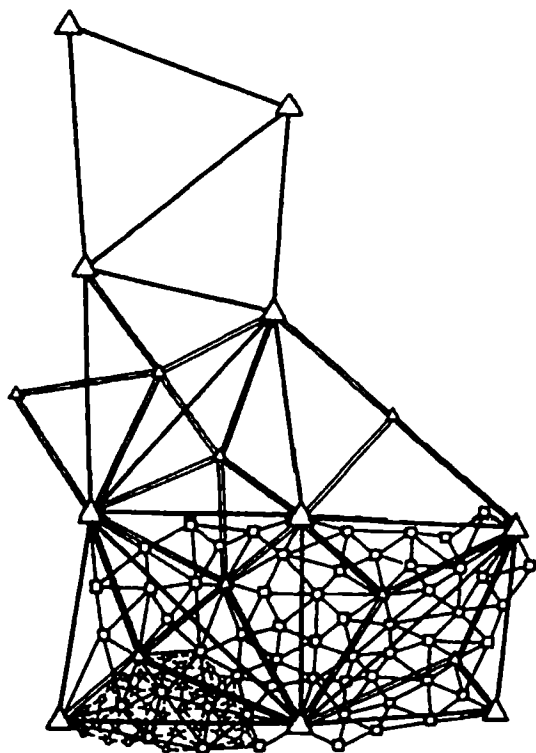
ности местоположение известных точек, которые, как мы уже знаем, называются пунктами опорной геодезической сети. Именно с этих исходных пунктов будут производиться измерения (точки А и В на рис. 36). А ещё нам потребуются получить координаты и высоты этих пунктов, чтобы нанести их положение на будущую карту и далее от исходного направления между пунктами А и В по произведенным измерениям отметить на карте положение определяемых ситуационных и рельефных точек. Так как же найти на местности эти пункты и как получить их координаты и высоты? Для этого (если, например, топографическая съёмка производится на территории города) необходимо обратиться в геодезический отдел управления главного архитектора городской мэрии и указать, как можно точнее, в каком районе города будет выполняться топосъёмка. При наличии соответствующего разрешения служащий мэрии предоставит каталог координат и высот вместе со схематическим чертёжом расположения геодезических пунктов, размещённых как можно ближе к району предполагаемых измерений. Но что значит, как можно ближе? Как правило, по полученному в мэрии каталогу, в радиусе, скажем, 200 м от объекта будущей съёмки будут находиться известные пункты опорной геодезической сети. Так сколько же таких известных пунктов должно быть на территории государства, чтобы практически на каждой улице можно было отыскать такой пункт?

Прежде чем ответить, считаю необходимым подчеркнуть, что в основу построения опорных геодезических сетей положен дедуктивный принцип "перехода от общего к частному". Этот принцип создания сетей является, не побоюсь этого слова, фундаментальным, поэтому, друзья, живо и стремительно разбираемся, в чём же проявляется дедукция применительно к конструированию геодезической опорной сети. А выражается эта дедукция (т.е. переход от общего к частному) в том, что опорную геодезическую сеть строят поэтапно, так сказать, поочерёдно в несколько стадий. Сначала создают исходную каркасную сеть в виде больших треугольников, со сторонами более 20 км. Затем на её основе формируют сеть второго порядка с более детальной геометрией, которая выражается в построении на местности треугольников с более короткими сторонами, например, 10 км. Далее, уже созданную сеть второго порядка принимают за исходную и расчленяют её на тре-

угольники со сторонами, скажем, в 5 км. Подобным образом производят сгущение сети (рис. 50) до тех пор, пока не будет обеспечена такая плотность пунктов, которая удовлетворила бы требованиям крупномасштабного картографирования, т.е. потребностям топографических съёмок.

И тогда, уважаемые коллеги, вы действительно найдёте почти на каждой улице геодезический пункт, и именно поэтому в заголовке этой главы я назвал опорную геодезическую сеть фундаментом карты. Ведь собственно с пунктов такой *геодезической опоры* производят топографическую съёмку для составления карты.

Мне бы совсем не хотелось, уважаемые дамы и господа, чтобы вам представлялось, что линии, соединяющие вершины треугольников на рис. 50, на местности обтянуты какой-то



К л а с с ы :

Δ 1-й, Δ 2-й, \square 3-й, о-4-й

Рис. 50. Построение опорной геодезической сети

проволокой или что между ними выбита какая-то маркированная или чем-то обозначенная граница. Нет и ещё раз нет. Конечно же, как треугольники, так и линии между их вершинами - воображаемые или, выражаясь по-современному, виртуальные. На местности эти линии проходят над лесами и полями, горами и пустынями, промышленными сооружениями и жилыми домами. Не виртуальными, а физически и реально существующими являются только закреплённые на местности центры геодезических пунктов, обозначенные, как правило, наружными знаками на открытых территориях и без них в застроенных зонах.

Опорная геодезическая сеть по своему назначению делится на плановую и высотную. **Плановая сеть** является носителем координат, а **высотная сеть** - высот геодезических опорных пунктов. По точности определения и плотности размещения своих пунктов высотная опорная геодезическая сеть, например, такого государства как Россия делится на пять стадий построения, а плановая сеть - на 7 классов (разрядов), причём первые четыре класса составляют *государственную (национальную) геодезическую сеть*, а остальные - *сети сгущения и сеть съёмочного обоснования*. Количество пунктов только государственной плановой геодезической сети приближается к полумиллиону (464000 пунктов). Общее же количество пунктов геодезической опоры России наверняка насчитывает несколько миллионов. Как же и когда удалось создать такую глобальную и массивную опорную сеть геодезических пунктов с известными координатами и высотами?

Вполне понятно, что геодезическая сеть многих стран создавалась не за один день, а в течение многих десятилетий. Однако, несомненно, был день, когда на территории отдельно взятого государства не было ни одного пункта, координаты и высоты которого были бы известны в заданной системе координат. С чего же начиналось построение плановой опорной геодезической сети, которая ранее создавалась методами триангуляции, трилатерации и полигонометрии, а сегодня посредством спутниковых технологий. Всё начиналось с **триангуляции**. Этот термин происходит от латинского слова *triangulum*, что в переводе означает треугольник. Забегая чуть вперёд, заметим, что метод триангуляции заключается в построении примыкающих друг к другу треугольников, в которых измеряются все (горизонтальные) углы и некоторые из сторон, назы-

ваемые *базисными*. По результатам этих измерений определяется положение (координаты) всех вершин треугольников в избранной системе координат. Однако, вернёмся к риторическому вопросу: как же всё это начиналось?

Итак, дано: на местности нет ни одной точки (пункта) с известными координатами, требуется: определить координаты вновь построенных на местности (рис. 51) геодезических пунктов.

Для выполнения этой непростой задачи снаряжена геодезическая экспедиция, в составе которой находится несколько полевых партий. Одна из них занимается рекогносцировкой (разведкой) местности, результатом которой является определение местоположения запроектированных геодезических пунктов. Другая полевая партия занимается буровыми и земляными работами, целью которых является закладка центров геодезических пунктов и строительство наружных знаков (пирамид и сигналов). Третья полевая партия, проходит проторенную предыдущими партиями дорогу с тем, чтобы, установив теодолит над построенными в вершинах треугольников пунктами, измерить горизонтальные углы. В дополнение эта партия также измеряет базисную линию I - II.

Сегодня, применяя современные электронные измерительные приборы, определение расстояния с миллиметровой точностью займёт не более получаса времени. Когда же зарождалось построение сети триангуляции, измерение расстояний считалось достаточно сложным технологическим процессом. Судите сами, бригада, которая участвовала в измерении линии I - II, длиной, предположим, 3 км, насчитывала 6 исполнителей, а процесс измерений такой линии занимал несколько

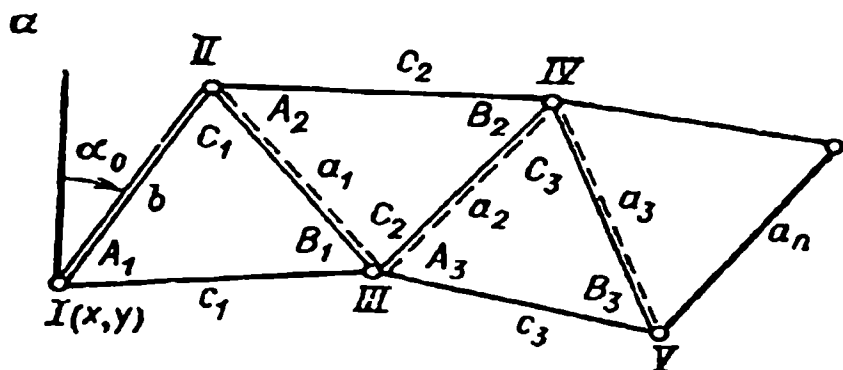


Рис. 51. Построение триангуляции и трилатерации

недель. Измерение базисной линии производилось инварными проволоками, обладающими небольшим коэффициентом расширения. Стандартная инварная проволока имела длину 24 м и диаметр - 2 мм, на концах проволоки имелись шкалы с миллиметровыми делениями. При измерении базисной линии триангуляции проволоки помещались на штативах, установленных в начале и в конце 24-метрового отрезка измеряемой линии, и натягивались гирями, которые подвешивались посредством стальных проволочек, перекинутых через подвижные блоки специальных станков. Нетрудно представить себе, сколько раз надо было уложить инварную проволоку (24 м), чтобы измерить трёхкилометровую линию. А если принять во внимание, что для достижения наилучшей точности линия измерялась в прямом и обратном направлениях, тремя разными инварными проволоками, то становится понятным, как не просто было измерить базисную линию триангуляции. Представляете? Думаю, что нет. А ещё, коллеги, вы не представляете, что хорошо продуманная методика таких, ушедших в анналы истории, линейных измерений, о которых я рассказал вам лишь в общих чертах, позволяла получать точность, равную 1:1 000 000, т.е. ошибка измерения линии, длиной в 3 км, составляла всего-навсего 3 мм.

Чтобы получить полную картину работы геодезистов-первопроходцев, вообразите, что находитесь на тридцатиметровом геодезическом сигнале, где установлен высокоточный теодолит. Порывистый ветер раскачивает пирамиду, ледяные снежинки падают на страницы полевого журнала, а горизонтальный круг угломерного прибора плавно вращает укрепленную на нём зрительную трубу. В окуляре трубы вы видите голубую тайгу, упирающуюся в бесконечную цепочку горных хребтов, на скалистых вершинах которых возвышаются геодезические сигналы, подобные тому, на котором установлен теодолит. Труба теодолита поочередно наводится на визирные цилиндры, насаженные на верхушках геодезических пирамид. Пирамиды находятся на приличном расстоянии друг от друга, в триангуляции 1 класса они могут превышать 20 км. Несмотря на значительное увеличение зрительной трубы, в перекрестии сетки нитей окуляра внушительный визирный цилиндр геодезического сигнала выглядит колеблющейся иголкой. При каждом наблюдении такой иголки, которая на самом деле является верхушкой сигнала, берётся отсчёт по

горизонтальному кругу, и количество таких отсчётов будет равно числу сигналов, на которые наводилась зрительная труба. В действительности отсчётов будет намного больше, поскольку каждый горизонтальный угол измеряется многократно по специальной программе. Затем пеший переход на другой сигнал, находящийся в соседней вершине этого же треугольника, и вновь зрительная труба смотрит на вершины (сигналы) искомого и других треугольников. В конечном итоге, теодолит перемещается вместе с вами с одного геодезического пункта на другой, пока в необозримой и протяжённой цепочке треугольников, покрывающих территорию необъятного государства, не будут измерены все горизонтальные углы. В этом вводном курсе нет смысла описывать методики измерения углов в триангуляции, но их точность, в зависимости от класса триангуляции, колеблется от 0,7 до 2 секунд.

А теперь, дамы и господа, позвольте мне подвести некоторые, пока, правда, предварительные, итоги. Во-первых, определена длина базисной линии I - II (рис. 51) нашей триангуляции и, во-вторых, произведены измерения углов во всех треугольниках нашей опорной сети. Тем самым, мы продвинулись вперёд и приблизились к нашей конечной цели, которая, напоминая, заключается в определении координат геодезических пунктов, построенных в вершинах треугольников опорной плановой геодезической сети. Производство описанных геодезических работ, как упоминалось выше, обеспечивали рекогносцировочная, строительная и измерительная партии. Настало время упомянуть об ещё одной, можно сказать, элитной партии, которая занимается *астрономическими измерениями*. Возникает вопрос, зачем в дополнение к геодезическим измерениям понадобились ещё и астроопределения. Об этом несколько ниже, а сейчас вспомним, что координаты пунктов II, III и т.д. (рис. 51), вычисляются по формулам прямой геодезической задачи (глава II, рис. 13):

$$X_{II} = X_I + b \cos \alpha_{I,II} , \quad (49)$$

$$Y_{II} = Y_I + b \sin \alpha_{I,II} , \quad (50)$$

$$X_{III} = X_I + c_1 \cos \alpha_{I,III} , \quad (51)$$

$$Y_{III} = Y_I + c_1 \sin \alpha_{I,III} , \quad (52)$$

$$X_{IV} = X_{II} + c_2 \cos \alpha_{II,IV} , \quad (53)$$

$$X_{IV} = X_{II} + c_2 \sin \alpha_{II,IV} , \quad (54)$$

$$X_{IV} = X_{III} + \alpha_2 \cos \alpha_{III,IV} , \quad (55)$$

$$Y_{IV} = Y_{III} + \alpha_2 \sin \alpha_{III,IV} . \quad (56)$$

В формулах (49)–(56) X_i и Y_i – координаты соответствующих геодезических пунктов; b – измеренная базисная сторона; c_1 , c_2 , α_2 – неизмеренные стороны треугольников; $\alpha_{i,j}$ – азимут стороны треугольника. Вы, уважаемые коллеги, конечно, обратили внимание, что в формулах (53)–(56) координаты пункта IV определены дважды: один раз из пункта II, а второй – из пункта III. Отмеченное выполнено в целях контроля вычислений. Это чрезвычайно важно, да и вообще производство контроля измерений и вычислений в геодезии в обязательном порядке предписывается всеми инструкциями и наставлениями и является неукоснительным и золотым правилом геодезии. Относительно контроля измерений применительно к нашему случаю: сумма измеренных углов в каждом треугольнике должна равняться 180° или отклоняться от неё на малую величину, допустимую нормативными документами.

Между тем, друзья, пора двигаться дальше по ещё не изученной до конца триангуляционной дорожке. В поле нашего зрения до сих пор находится рис. 51. На нём азимут базисной стороны I–II ($\alpha_{I,II}$) обозначен как α_0 . Попытаемся выразить азимуты других сторон через азимут α_0 (который впоследствии назовём исходным) через измеренные углы во всех треугольниках (а иначе для чего мы их измеряли?) Для этого воспользуемся простыми геометрическими соотношениями:

$$\alpha_{I,II} = \alpha_0 , \quad (57)$$

$$\alpha_{I,III} = \alpha_0 + \angle A_1 , \quad (58)$$

$$\alpha_{II,III} = \alpha_0 + 180^\circ - \angle C_1 , \quad (59)$$

$$\alpha_{II,IV} = \alpha_0 + 180^\circ - (\angle C_1 + A_2) , \quad (60)$$

$$\alpha_{III,IV} = \alpha_0 + 180^\circ + \angle A_1 + \angle B_1 + \angle C_2 . \quad (61)$$

Приступая к следующему этапу наших математических изысканий, вспоминаем, возможно, давно забытую, теорему синусов. В соответствии с этой теоремой:

$$\frac{c_1}{b} = \frac{\sin \angle C_1}{\sin \angle B_1}, \quad c_1 = b \frac{\sin \angle C_1}{\sin \angle B_1}, \quad (62)$$

$$\frac{\alpha_1}{b} = \frac{\sin \angle A_1}{\sin \angle B_1}, \quad \alpha_1 = b \frac{\sin \angle A_1}{\sin \angle B_1}, \quad (63)$$

$$\frac{c_2}{\alpha_1} = \frac{\sin \angle C_2}{\sin \angle B_2}, \quad c_2 = \alpha_1 \frac{\sin \angle C_2}{\sin \angle B_2}, \quad c_2 = b \frac{\sin \angle A_1}{\sin \angle B_1} \frac{\sin \angle C_2}{\sin \angle B_2}, \quad (64)$$

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\sin \angle A_2}{\sin \angle B_2}, \quad \alpha_2 = \alpha_1 \frac{\sin \angle A_2}{\sin \angle B_2}, \quad \alpha_2 = b \frac{\sin \angle A_1}{\sin \angle B_1} \frac{\sin \angle A_2}{\sin \angle B_2}. \quad (65)$$

Подставляя системы формул (57)–(61) и (62)–(65) в выражения (49)–(56), окончательно получим математическую концепцию для вычисления координат определяемых геодезических пунктов в виде:

$$X_{II} = X_I + b \cos \alpha_0, \quad (66)$$

$$Y_{II} = Y_I + b \sin \alpha_0, \quad (67)$$

$$X_{III} = X_I + b \frac{\sin \angle C_1}{\sin \angle B_1} \cos(\alpha_0 + \angle A_1), \quad (68)$$

$$Y_{III} = Y_I + b \frac{\sin \angle C_1}{\sin \angle B_1} \sin(\alpha_0 + \angle A_1), \quad (69)$$

$$X_{IV} = X_{II} + b \frac{\sin \angle A_1}{\sin \angle B_1} \frac{\sin \angle C_2}{\sin \angle B_2} \cos(\alpha_0 + 180^\circ - \angle C_1 - \angle A_2), \quad (70)$$

$$Y_{IV} = Y_{II} + b \frac{\sin \angle A_1}{\sin \angle B_1} \frac{\sin \angle C_2}{\sin \angle B_2} \sin(\alpha_0 + 180^\circ - \angle C_1 - \angle A_2). \quad (71)$$

Принимая во внимание (66) и (67), формулы (70) и (71) представятся следующим образом:

$$X_{IV} = X_I + b \cos \alpha_0 + b \frac{\sin \angle A_1}{\sin \angle B_1} \frac{\sin \angle C_2}{\sin \angle B_2} \cos(\alpha_0 + 180^\circ - \angle C_1 - \angle A_2), \quad (72)$$

$$Y_{IV} = Y_I + b \sin \alpha_0 + b \frac{\sin \angle A_1}{\sin \angle B_1} \frac{\sin \angle C_2}{\sin \angle B_2} \sin(\alpha_0 + 180^\circ - \angle C_1 - \angle A_2). \quad (73)$$

Это всё, что касается вывода формул, и не всё относительно того, что вытекает из этих формул. Вы уж, мадам и месье, простите меня великодушно, что опутал вас лавиной громоздких математических выражений. В своё оправдание хочу лишь подчеркнуть, что сделал это только для того, чтобы дать интерпретацию простому утверждению: для вычисления координат пунктов триангуляции достаточно измерить базисную сторону и горизонтальные углы во всех построенных треугольниках. Да и в самом деле, коллеги, взгляните ещё раз на конечные формулы (66)–(69) и (72)–(73). Все параметры, входящие в эти выражения, являются измеренными, а значит и известными величинами, кроме координат X_I , Y_I пункта I и азимута α_0 базисной стороны I–II.

Как же сделать так, чтобы неизвестные координаты этого пункта и неизвестный азимут базисной линии получили статус известных величин? Чудес не бывает: их необходимо измерить. Но разве можно измерять координаты? Оказывается не только можно, а и нужно. И выполняет это чудодействие упомянутая выше астрономическая партия. Астрономогеодезисты устанавливают в пункте I высокоточный прибор, называемый астрономическим универсалом и предназначенный для астрономических наблюдений. Эти наблюдения заключаются в измерении зенитных расстояний (формула (20), глава IV) небесных светил, измерении соответствующих горизонтальных углов и фиксации моментов времени этих измерений по часам. Применительно к параметрам измерений (по сути, как и в геодезии, измеряются угловые величины) астрономические наблюдения сопоставимы с геодезическими измерениями. Однако если в геодезии зрительная труба прибора наводится на веху, рейку, рефлектор или, в конце-концов, на угол здания, то при астроопределениях визирной целью являются звёзды (небесные светила) и наблюдения производятся в ночное время. Методика астрономических измерений базируется на серьёзной и непростой теоретической основе. Для этого студенты астрономогеодезической специальности изучают курсы небесной механики, сферической (теоретической) астрономии и геодезической (практической) астрономии. Понятно, что в рамках этого вводного пособия нет возможности даже кратко и конспективно изложить основные аспекты астрометрии. Отметим лишь, что по данным ночных звёздных измерений, в результате достаточно сложной математической обработки

вычисляются астрономическая широта φ и астрономическая долгота χ пункта I, а также азимут α_0 базисной линии I - II. Далее от астрономических координат φ и χ точки I, которые привязаны к поверхности геоида (глава I), переходят к геодезическим координатам B и L той же точки I, только уже на эллипсоиде (глава 1).

В этой же первой главе введено понятие *истинного азимута*. Было сказано, что под истинным азимутом подразумевают астрономический или геодезический азимуты. В конечном итоге во избежание путаницы и разночтения договорились о том, что объединим два слова астрономия и геодезия в одно - география, и тем самым назовём истинный азимут *географическим*. Однако, между астрономическим и геодезическим азимутами (см. главу 1) всё же имеется небольшое различие. Когда речь идёт об исходном азимуте опорной геодезической сети это различие, называемое уклонением отвесной линии, всё-таки необходимо учитывать. Вычисляется эта величина как раз с помощью астрономической долготы χ и астрономической широты φ , которые астрономы измерили на пункте I. Таким образом, и переходят от астрономического азимута к геодезическому применяя при этом следующую формулу:

$$A_I = A + (L - \chi) \sin \varphi, \quad (74)$$

где A_I – геодезический азимут; A – астрономический азимут; L – геодезическая долгота; χ – астрономическая долгота; φ – астрономическая широта.

Мы перешли от измеренного астрономического азимута к азимуту геодезическому, но облегчённо вздохнуть ещё рано. Выше говорилось, что в конечных формулах для вычисления координат пунктов опорной геодезической сети должен быть не геодезический азимут A_I , а α_0 - азимут картографической сетки (дирекционный угол). Поэтому надлежит сделать ещё один переход: на этот раз от геодезического (географического) азимута A_I к азимуту картографической сетки α_0 . Это уже совсем не сложно, надо только снова вернуться к первой главе этой книги и взглянуть на формулу (3) в обозначениях уже текущей главы:

$$\alpha_0 = A_I - \gamma, \quad (75)$$

где γ – сближение меридианов, которое можно отыскать из следующего соотношения

$$\gamma = l \sin \varphi = (L - L_0) \sin \varphi, \quad (76)$$

где l – разность между геодезической долготой L пункта I и долготой осевого меридиана L_0 ; φ – геодезическая широта пункта I .

Вычислив, наконец, азимут картографической сетки стороны $I-II$ α_0 , необходимо вспомнить, что конечной нашей целью является всё-таки получение плоских прямоугольных координат X, Y точки I . В курсе высшей геодезии рассматривается теория и выводятся формулы преобразования сферических геодезических координат B и L в плоскостные прямоугольные X и Y , т.е. между ними существуют взаимосвязи, выражаемые следующими соотношениями:

$$X = f(B), \quad (77)$$

$$Y = f(L). \quad (78)$$

Используя при математической обработке соотношения (74)–(76) и развёрнутые выражения формул (77) и (78), мы финишируем, возводя в соотношениях (66)–(69) и (72)–(73) неизвестные координаты пункта I : X_I, Y_I и неизвестный азимут географической сетки α_0 стороны $I-II$ в разряд *известных параметров*, что, собственно, и требовалось доказать. Пространный веер замысловатых вышеприведенных формул приведен, чтобы в корректном математическом формате не только показать, но и доказать, что при создании опорной геодезической сети методом триангуляции, координаты геодезических пунктов получают посредством высокоточных измерений горизонтальных углов запроектированных треугольников. При этом измеряют базисную линию, а координаты исходного пункта определяют из астрономических измерений. На этом и основан принцип триангуляции, который не одно столетие являлся основным методом развития геодезических сетей.

В приведенном пространном повествовании о триангуляции красной нитью сплетается сущность этого метода, который заключается в измерении *углов треугольников*. С появле-

нием высокоточных светодальномеров и радиодальномеров в построенной сети треугольников появилась возможность измерять не только базисную линию, а и *все стороны*. При этом геодезическое построение, представленное на незабываемом рис. 51, стали называть **трилатерацией**, название которой происходит от латинского слова *trilateral* (трёхсторонний). Данный метод определения положения пунктов опорной геодезической сети заключается в построении на местности сети последовательно связанных между собой треугольников и измерения в каждом из них всех трёх сторон. Как и в триангуляции, здесь в начальном (исходном) пункте сети измеряются астрономические координаты (широта и долгота) и астрономический азимут. Как и в триангуляции, конечной целью рассматриваемого метода является определение координат геодезических пунктов опорной сети. Чтобы получить эти координаты, надлежит вспомнить незабвенные школьные годы, а вместе с ними симпатичную математичку, которая каллиграфическим почерком выводила на доске теорему косинусов. Применительно к рис. 51, эта теорема выражается следующими соотношениями:

$$b^2 = a_1^2 + c_1^2 - 2a_1c_1 \cos \angle B_1, \quad (79)$$

$$c_1^2 = b^2 + a_1^2 - 2ba_1 \cos \angle C_1, \quad (80)$$

$$c_2^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos \angle C_2, \quad (81)$$

$$a_2^2 = a_1^2 + c_2^2 - 2a_1c_2 \cos \angle A_2, \quad (82)$$

$$a_1^2 = b^2 + c_1^2 - 2bc_1 \cos \angle A_1, \quad (83)$$

$$a_1^2 = a_2^2 + c_2^2 - 2a_2c_2 \cos \angle B_2. \quad (84)$$

Из формул (79)–(84) следует, что

$$\cos \angle B_1 = \frac{a_1^2 + c_1^2 - b^2}{2a_1c_1}, \quad (85)$$

$$\cos \angle C_1 = \frac{b^2 + a_1^2 - c_1^2}{2ba_1}, \quad (86)$$

$$\cos \angle C_2 = \frac{a_1^2 + a_2^2 - c_2^2}{2a_1a_2}, \quad (87)$$

$$\cos \angle A_2 = \frac{a_1^2 + c_2^2 - a_2^2}{2a_1c_2}, \quad (88)$$

$$\cos \angle A_1 = \frac{b^2 + c_1^2 - a_1^2}{2bc_1}, \quad (89)$$

$$\cos \angle B_2 = \frac{a_2^2 + c_2^2 - a_1^2}{2a_2c_2}. \quad (90)$$

Подставляя значения углов, вычисленных по формулам (85)–(90), в соотношения (66)–(69) и (72)–(73), получим выражения для вычисления координат геодезических пунктов II, III, IV (рис. 51) по измеренным сторонам в треугольниках. Ради экономии своей бумаги и вашего времени, я не привожу окончательных формул из-за их громоздкости. Однако тем читателям, которые всё-таки горят непреодолимым желанием рассмотреть эти конечные выражения во всех деталях, я предоставляю возможность самостоятельно поупражняться в алгебре и тригонометрии с тем, чтобы убедиться, что, действительно, по полученным из измерений длинам линий можно определить координаты точек опорной геодезической сети, что, собственно, и составляет сущность трилатерации.

Существует ещё один, достаточно распространённый в практической геодезии, метод создания опорных геодезических сетей. С одной стороны, он в некоторой мере является конгломератом методов триангуляции и трилатерации, так как в нём сочетаются как угловые, так и линейные измерения. С

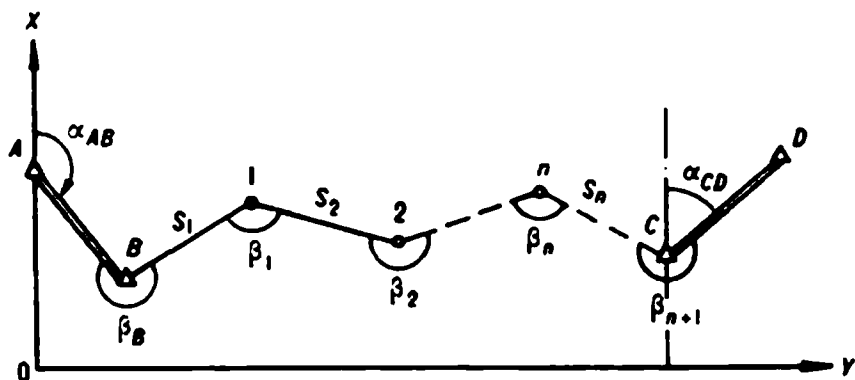


Рис. 52. Полигонометрия

другой стороны, он отличается от перечисленных методов, прежде всего, геометрией построения пунктов геодезической сети. Этот метод развития геодезической опоры получил название полигонометрия (рис. 52). **Полигонометрия** - это метод определения положения геодезических пунктов путём измерения на местности длин линий, последовательно соединяющих эти пункты, и горизонтальных углов между ними. Нет сомнений, дамы и господа, что это определение не вызвало у вас особых затруднений. А если так, то начинаем вникать в суть дела, т.е. в сущность полигонометрической технологии.

Прошу вас, друзья, внимательно взглянуть на рис. 52. На нём изображены исходные пункты А и В с одной стороны линии, соединяющие определяемые полигонометрические пункты 1, 2, ..., n и исходные пункты С и D, находящиеся по другую сторону этой, так называемой, ходовой линии. Этими исходными или известными пунктами могут быть пункты триангуляции или трилатерации, координаты которых заведомо определены, чем мы, собственно, и занимались в предыдущих выкладках. Следует подчеркнуть, что полигонометрический ход (так в геодезии принято называть линию 1, 2,..., n) всегда и повсеместно должен опираться на известные пункты А, В, С, D (в практике измерений это действие именуется привязкой к исходным пунктам геодезической сети). Ведь не будем забывать, что координаты новых определяемых пунктов не падают с воздуха, их получают на основе координат известных пунктов (в нашем случае это - геодезические пункты В и С). Это, во-первых. Во-вторых, по известным координатам пунктов А, В, С, D по формуле (10) обратной геодезической задачи (глава II) определяются азимуты картографической сетки начальной (α_{AB}) и конечной (α_{CD}) исходных сторон АВ и CD, которые необходимы для последующих вычислений в качестве известных параметров:

$$\tan \alpha_{AB} = \frac{Y_B - Y_A}{X_B - X_A}, \quad (91)$$

$$\tan \alpha_{CD} = \frac{Y_D - Y_C}{X_D - X_C}. \quad (92)$$

И, наконец, в-третьих, все эти известные параметры $X_A, Y_A,$

$X_B, Y_B, X_C, Y_C, X_D, Y_D, \alpha_{AB}, \alpha_{CD}$ также необходимы для контроля как наших измерений, так и наших вычислений.

Запускаю нашу традиционную вставку: дано - координаты пунктов $A(X_A, Y_A), B(X_B, Y_B), C(X_C, Y_C), D(X_D, Y_D)$, азимуты α_{AB}, α_{CD} , измеренные углы $\beta_B, \beta_1, \beta_n, \beta_{n+1}$, измеренные стороны S_1, S_2, S_n ; требуется определить - координаты пунктов $1(X_1, Y_1), 2(X_2, Y_2) \dots n(X_n, Y_n)$. Итак, дорогие коллеги, задача поставлена, и у меня нет другого пути, как не ввести ваше воображение в мир не таких уж и сложных формул. Поехали. В начале нашей поездки снова вспоминаем золотую формулу геодезии - формулу (10) прямой геодезической задачи. В соответствии с ней получим:

$$X_1 = X_B + S_1 \cos \alpha_{B,1}, \quad (93)$$

$$Y_1 = Y_B + S_1 \sin \alpha_{B,1}, \quad (94)$$

$$X_2 = X_1 + S_2 \cos \alpha_{1,2}, \quad (95)$$

$$Y_2 = Y_1 + S_2 \sin \alpha_{1,2}, \quad (96)$$

$$X_n = X_{n-1} + S_n \cos \alpha_{n-1,n}, \quad (97)$$

$$Y_n = Y_{n-1} + S_n \sin \alpha_{n-1,n}. \quad (98)$$

А если ещё вспомнить элементарную геометрию, то легко заметить, что

$$\alpha_{B,1} = \alpha_{AB} + 180^\circ - \beta_B, \quad (99)$$

$$\alpha_{1,2} = \alpha_{B,1} + 180^\circ - \beta_1, \quad (100)$$

$$\alpha_{n,n+1} = \alpha_{n-1,n} + 180^\circ - \beta_n. \quad (101)$$

Последовательно подставляя (99)–(101) в (93)–(98), получим окончательные формулы, по которым координаты определяемых пунктов вычисляются через измеренные углы и измеренные расстояния, что и является сущностью полигонометрии как метода создания опорной геодезической сети.

Ну что ж, глубокоуважаемые, как говорят наши итальянские коллеги, синьорины и синьоры, я, пожалуй, закончил свой конспективный экскурс, посвящённый технологии построения **плановых опорных геодезических сетей**, надеюсь, что вы с

глубоким пониманием восприняли его. И это даёт мне право незамедлительно перейти к **высотным опорным геодезическим сетям**. Не вызывает сомнений, что если пункты плановых сетей являются носителями координат X , Y , то пункты высотных сетей представляются как производители высоты H , отсчитываемой от урениной поверхности геоида или, по-простому, от среднего уровня моря в конкретной географической зоне. Производство этих высот реализуется посредством измерений методом геометрического нивелирования (глава 5). Поэтому зачастую высотные геодезические сети называют **нивелирными сетями**. Высотная геодезическая опора предназначена для распространения на территорию государства единой системы высот. Как и плановая опорная сеть, она создаётся с целью обеспечения картографирования страны во всех масштабах и решения различных научных и прикладных задач в области геодезии.

Высотные сети, как и плановые, создаются по принципу "от общего к частному". Их построение осуществляется в несколько стадий (классов). На рис. 53 показан фрагмент создания такой сети, где изображены пункты нивелирования первого, второго, третьего и четвёртого классов. По аналогии с пунктами плановой сети высотная опора закрепляется на местности соответствующими знаками, которые называются реперами. Само слово репер происходит от французского выражения *geree*, что в переводе означает - знак, исходная точка. В геодезическом толковании, репер - это действительно исходная точка, это действительно знак, закрепляющий точку земной поверхности, высота которой определена путём нивелирования относительно исходной урениной поверхности, надо понимать, поверхности геоида или ещё проще (в каком-то приближении) от уровня моря. По своей конструкции реперы под-

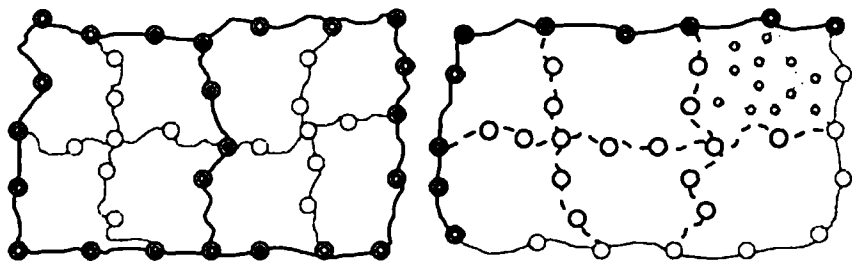


Рис. 53. Схема высотной геодезической сети

разделяются на грунтовые и стенные (рис. 54).

Грунтовые реперы по подобию с центрами плановой геодезической сети представляют собой массивные железобетонные пилоны и монолиты, закладываемые в грунт, как правило, на открытой местности. На застроенной территории принято использовать *стенные реперы* (металлические марки или диски диаметром 8–10 см), которые закрепляются в несущие конструкции (стены) каменных или бетонных сооружений (дома, башни, мосты и т. д.). Именно на эти грунтовые или стенные реперы как раз и помещается *нивелирная рейка*, посредством которой, как было показано в главе 5, и измеряются превышения между точками с тем, чтобы в конечном итоге вычислить их высоты. До сих пор в своём объяснении я употреблял слово "по аналогии" с плановой опорной сетью. А сейчас позволю себе вставить слово "в отличие". Так вот, в отличие от плановой опоры при построении высотных сетей нет необходимости строить громоздкие возвышенные наружные знаки (сигналы и пирамиды), так как измерения в этих сетях, как было сказано выше, производятся с помощью нивелирных реек, устанавливаемых на точках, расположенных на зем-

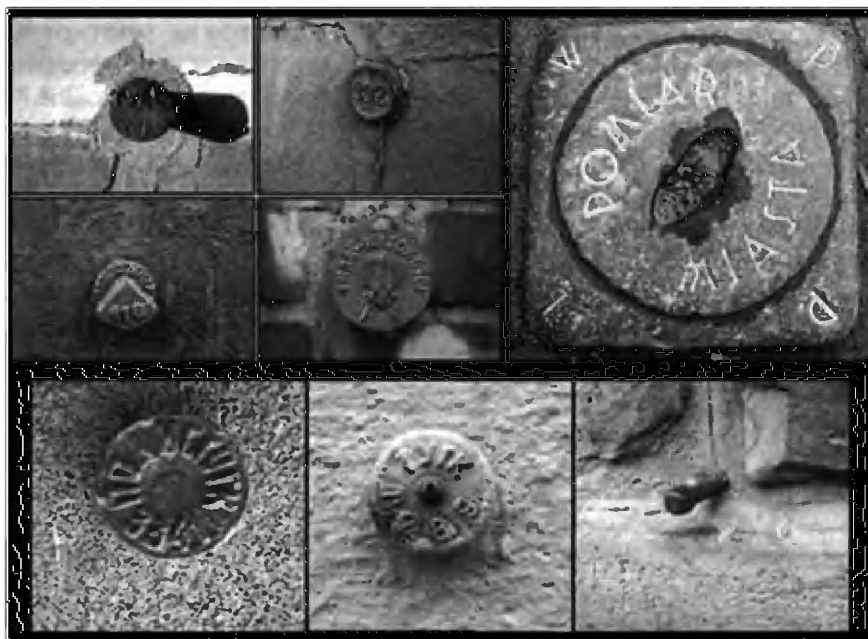


Рис. 54. Нивелирные знаки: грунтовые и стенные реперы

ной поверхности. Да и сама методология создания высотных сетей выстроена так, что расстояния между измеряемыми точками небольшие (как правило, они не превышают 150 м), и нивелирные рейки хорошо просматриваются в поле зрения зрительной трубы нивелира. Не углубляясь в дебри этой методологии, хотелось бы, тем не менее, уважаемые коллеги, чтобы вы понимали, о чём идёт речь. Поэтому, осмелюсь попросить вас ещё раз взглянуть на рис. 53. На левой части рисунка можно видеть, как пункты высотной опорной геодезической сети образуют полигоны первого и второго классов. На правой части того же рисунка построены полигоны третьего и четвёртого классов. Таких классов сгущения сети может быть и больше. Например, в такой стране как Россия, их пять. Длина полигонов нивелирования первого класса превышает там 3000 км, а второго класса достигает 600 км и третьего класса составляет 150–200 км. Для чего, друзья, я загружаю вас этой, может быть, излишней цифровой информацией? Думаю, только для того, чтобы вы не подумали, как это иногда представляется моим студентам, что приведенные расстояния составляют интервал между пунктами высотной сети. Будьте любезны, коллеги, в очередной раз всмотреться в рис. 53. Реперы нивелирования первого и второго классов закладываются на незастроенных территориях в среднем через 60 км. А расстояния, к примеру, между реперами четвёртого класса на застроенной территории (города) могут составлять 300–800 м. В любом случае, друзья, вы должны понимать, что между кружками (рис. 53), изображающими реперы нивелирования, на местности устанавливаются промежуточные (переходные) точки, превышения между которыми измеряются с единственной целью - определить, в конечном итоге, высоту искомого репера. Эти реперы, разумеется, по заранее составленной программе закладываются в грунт или устанавливаются в цокольной части сооружений. Когда-то давно от одного из них, который был расположен наиболее близко к морю, от его уровня (в России это - Кронштадтский футшток, о котором мы говорили в главе 5), с помощью нивелира измерили превышение (между футштоком и данным репером) и таким образом определили высоту данного репера. А затем путём таких же измерений получили высоты сотен тысяч реперов, разбросанных по тундровым и горным, таёжным и степным, лесным и пустынным весям и просторам необъятной страны. С этого

момента высоты этих реперов стали классифицироваться как известные и получили статус исходных для определения высот уже других точек, элементов ситуации и рельефа топографической карты.

ГЛАВА 8

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Понятие о географических информационных системах (ГИС). Общие сведения о глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС)

*На свете много есть чудес,
Одно из них есть GPS.
Система эта с картой в дружбе
У геодезии на службе.*

Уважаемые пассажиры, многоуважаемые коллеги, спешу поздравить вас с прибытием нашего символического поезда к конечной станции. В принципе, я изложил, а вы познали простую технологическую процедуру создания топографической карты, что составляет генеральную, я бы сказал, краеугольную часть геодезической науки. Однако, с вашего позволения, друзья, перед тем, как ставить жирную точку в своём повествовании, я хотел бы познакомить вас с актуальными тенденциями современной геодезии вообще и их применением в измерениях и картосоставлении в частности. Так уж получилось, что конец второго тысячелетия, именуемого в западноевропейской историографии незабвенным словом "millennium", ознаменовался компьютеризацией многих аспектов нашего бытия, а с ней и появлением на свет двух грандиозных систем, связанных с науками о Земле: геоинформационной и навигацион-

ной. Мой рассказ о геодезии был бы незавершённым без интерпретации принципа работы этих систем, в значительной мере осуществивших переворот не только в геодезии, но и в повседневной жизни современного человека.

Начнём наш экскурс, с GIS - Geographic Information System, что в русской транскрипции означает - **географическая информационная система (ГИС)**. Сегодня, в связи с возрастающей ролью этих систем во всех сферах нашей жизни, существуют десятки определений ГИС. Приведём из этого многочисленного списка самое доступное и понятное из них, принадлежащее английскому профессору, географу Дэвиду Райнду: географическая информационная система - это компьютерная система для сбора, проверки, интеграции и анализа информации, относящейся к земной поверхности.

Не вызывает сомнения факт, что при составлении карты обычным способом тоже собирается, проверяется, интегрируется (генерализируется, особенно при изготовлении мелкомасштабной карты) и анализируется информация, привязанная к земной поверхности. Следовательно, ключевым в этом определении является словосочетание "компьютерная система". Ещё одно ключевое прилагательное к слову система - это географическая. География по своей сути - понятие ёмкое, содержательное и многофакторное. Но как бы там ни было, всю эту многофакторность отражает очень уж существенный параметр, который мы называем карта, полученной наземной съёмкой или аэрофотосъёмкой. Следовательно, именно карта является, если не основным, то достаточно важным поставщиком информации для ГИС. И не надо забывать, что карта сама по себе не падает с неба, а есть результат сложного и многоэтапного процесса, движущей силой которого являются геодезические измерения. Своим не столь лирическим, а скорее технологическим отступлением я хотел лишь напомнить, что основой и неотъемлемой составляющей, живительным и неиссякаемым источником ГИС являются координаты и высоты точек местности, полученные путём измерений горизонтальных и вертикальных углов, расстояний и превышений, о чём большинство пользователей ГИС даже не подозревают. Но об этом, в смысле о пользователях, потом. А сейчас продолжим знакомиться с принципами создания географических информационных систем.

Возвращаемся к исходному понятию ГИС, к *карте*. Сегодня,

она изменила форму своего представления, появилась возможность работать с ней не в раскатанном виде на столе начальника войскового штаба, не сжатой в планшете полевого командира и не висящей на стене в школьном классе, по которой скользит указка учителя географии. Сегодня карта высвечивается на компьютерном мониторе у штурманов океанского лайнера и пассажирских аэробусов, на борту космических кораблей, в кабинетах руководителей всех рангов, на экранах спутникового навигатора GPS и мобильных телефонов. Поэтому, в приведенном выше определении ГИС, основополагающим критерием представляется словосочетание *компьютерная система*, ибо только эта система позволяет сформировать ядро географической информационной системы, которая включает в себя два компонента: данные и программное обеспечение. Прежде всего, попытаемся разобраться с понятием *данные*. Они делятся на географические и описательные. *Географические данные* характеризуют форму и положение географических объектов, пространственные связи между ними, а *описательные*, их ещё называют *табличными*, помещённые в специальные таблицы, выражают соответствующие цифровые и текстовые характеристики вышеозначенных объектов. Что же касается *программного обеспечения*, то оно как раз и позволяет на основе географических и описательных данных сформировать картографическое представление, необходимое для каждой конкретной задачи. Применительно к разделению данных, один из популярных программных продуктов для создания ГИС под названием ARC/INFO как раз и подразумевает под словом ARC - описание пространственного положения объекта, а INFO - описание характеристики того же объекта. Не вдаваясь в тонкости программного обеспечения ГИС (в конце-концов это дело операторов, программистов, системных аналитиков, проектировщиков и создателей баз данных), хочу подчеркнуть, что именно программное обеспечение позволяет вводить, сохранять, анализировать и отображать географическую информацию, управлять базой данных и обеспечивать визуализацию информации. Таким образом, основная идея географической информационной системы заключается в стыковке или в совмещении географических данных, другими словами, электронной карты с обычной или, как мы её назвали, описательной базой данных. В упрощённом виде использование ГИС представляет собой

слияние картографии (геодезии) с базой данных, создаваемой для реализации конкретной задачи. В более возвышенной интерпретации можно определить географическую информационную систему как метод, возможно даже методологию для аналитической работы практически с любой информацией, привязанной к координатной системе поверхности Земли.

Разбавим сухие теоретические формулировки и определения ГИС практическим примером. В качестве иллюстрации приведём географическую информационную систему, созданную для коммунальных служб города. Исходной основой этой системы являлся комплекс топографических карт масштаба 1:500, созданных на территории города. На этих крупномасштабных картах изображались все необходимые элементы городского пространства: дома и сооружения, проезды и улицы, скверы и парки, транспортные и подземные коммуникации и т.д. Все эти карты были внесены (сканированы) в компьютерную память. С другой стороны, в электронную базу данных вводились технические паспорта домов и коммуникаций инфраструктуры (канализация, водопровод, тепловые сети, газовые прокладки, подземные сети линий связи, кабели телевидения и электросетей). Технический паспорт дома представлял собой документ со следующей информацией: название района города, название улицы, номер дома, данные о владельце или жителях дома (фамилии, имена, год рождения и т.д.), год постройки дома, число квартир, число лестничных пролётов, количество жителей, число этажей, количество однокомнатных, двухкомнатных, трёхкомнатных и четырёхкомнатных квартир, площадь дома, площадь квартир, площадь каждой из комнат квартиры и т.д. В паспорт канализационной сети входила характеристика каждого колодца (количество труб, материал из которого они изготовлены, диаметр, глубина заложения), паспорт электросетей включал в себя данные о разрешённой и установленной мощности, величинах напряжения и сопротивлении контура, источнике питания, номере трансформатора, глубине прокладки. Теперь понятно, сколько информационных слоёв и подслоёв предстоит произвести разработчикам данной локальной географической информационной системы. Если к этому добавить, что в городе насчитываются десятки тысяч зданий и не одна тысяча линий подземных прокладок и их выходов (люков и колодцев), то можете себе представить, какую массивную и должным образом

сконструированную по структуре базу данных должны создать программисты, чтобы, в конечном итоге, соответствующими программными средствами соединить её с заранее выстроенной электронной картой. Зато теперь муниципальная коммунальная служба в лице инженеров водоканалтреста или управления городских электросетей в любой момент времени сможет одним или несколькими кликами по клавишам персонального компьютера не только вывести на его экран сочетание интересующих его параметров и получить необходимую техническую информацию, а и выполнить соответствующее проектирование в части ремонта жилых зданий и инженерных городских сетей. В качестве иллюстрации ГИС может служить карта (рис. 55), созданная в цифровой форме представления данных и предназначенная для решения навигационных задач автомобильного транспорта и содержащая информацию об объектах местности, об организации дорожного движения, об объектах придорожной структуры и сервиса, адресную и другую информацию.

Итак, в общих чертах понятно, как функционирует географическая информационная система. Не затрагивая "программистских" тонкостей и нюансов, попробуем углубиться в эту совсем не простую систему, чтобы осознанно понять основной принцип её работы. Очевидно, что ГИС хранит информацию о реальном мире в виде набора тематических слоёв, которые объединены на основе географического положения. Поэтому, уточняя приведенное в начале главы определение профессора Райнда, сформулируем ГИС как компьютерную систему, позволяющую показывать необходимые данные на электронной карте на основе хранящихся в базе данных тематических слоёв. На таких электронных картах, в отличие от привычных бумажных, можно будет показать не только географические, а и математические, физические, технологические, экономические, политические, социальные, управленческие, демографические, статистические и множество других данных и атрибутов. ГИС как электронная карта нового поколения будет отражать не только количественные, а и качественные характеристики рассматриваемого объекта. Если ранее карта состояла на вооружении, в основном, геологов, геодезистов, военных, туристов, лётчиков и космонавтов, то теперь в удобной и наглядной форме ГИС смогут пользоваться менеджеры и бизнесмены, юристы и спортивные тренеры,



политики и экономисты, диспетчеры и транспортники и т.д. Если на обычной карте взгляд охватывал только информацию, содержащуюся, как правило, на одном из её листов, то ГИС содержит в себе завуалированную информацию, которая добывается порционно, а точнее, послойно. Причём один слой может включать в себя дорожную сеть, другой - водные ресурсы, третий - парки и скверы, четвёртый - леса, пятый - театры и кинотеатры, шестой - магазины и т.д. Примеры такого расслоения показаны на рис. 56 и рис. 57.

Каждый слой можно рассматривать как по отдельности, так и в их определённом сочетании. ГИС позволяет, с одной стороны, дифференцировать (разделять) интересующие нас данные, а с другой стороны, интегрировать (обобщать) пространственную (географическую) информацию, осмысленно и целенаправленно добавляя к ней любые другие всевозможные виды информации.

Географические информационные системы, которые по сути являются одним из параметров технологической революции в электронной сфере, позволили превратить далеко не всеми читаемую карту в универсальное мониторное табло, которое отражает, если и не всё многообразие окружающего мира, то подавляющее число его атрибутов. Именно поэтому ГИС нашли широкое применение в экологии и природопользовании, в земельном кадастре и демографии, социологии и

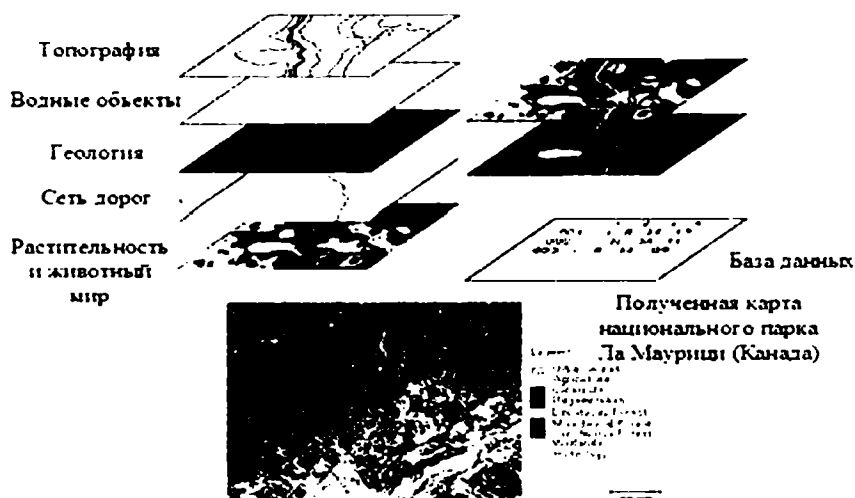


Рис. 56. Послойное представление информации в ГИС

политологии. Особое место занимает ГИС в управлении различными процессами, например, управление городским хозяйством, управление дорожным движением, транспортными потоками и маршрутами и т.д. Незаменимы ГИС в планировании и проектировании объектов различного профиля и назначения, включая тактическое и стратегическое планирование военных операций. Большое значение имеет ГИС при прогнозировании чрезвычайных ситуаций техногенного характера (землетрясения, наводнения, ураганы). Итак, географические информационные системы - это широкоформатное электронное окно, открывающее нам многообразные признаки, показатели и свойства окружающего мира на фоне нашей голубой планеты.

Перейдём к рассмотрению ещё одной современной системы, которая называется **навигационной**. Многие слышали магическое трёхбуквенное сокращение GPS. Эта английская аббревиатура знакома сегодня едва ли не каждому школьнику. GPS - это революционное современное, если хотите, ультрамодное понятие не только в навигации, ориентировании и в пространственном функционировании, но и новая страница во взаимодействии человека в заданной координатной системе. GPS - это, в конце концов, поворотный, переломный пункт в истории развития как теории, так и практики геодезической науки. С лёгким сожалением должен констатировать, что с появлением GPS некоторые каноны классической геодезии, связанные с технологией измерений и методикой их математической обработки, в одночасье ушли в небытие. С другой



Рис. 57. Расчленение элементов информации в ГИС

стороны, GPS развернула устои геодезии, внеся эпохальные изменения в точностные и экономические параметры, характеризующие процесс измерений. Сколько научных статей в солидных сборниках, сколько толстых монографий и увесистых диссертаций было посвящено совершенствованию точности измерений, сколько разнообразных методик, методов и даже методологий было разработано учёными-геодезистами, чтобы свести к минимуму ошибки измерений. И вот явилась на свет революционная технология (почёт и уважение её создателям), которая позволила решить, если не все, то большинство затруднений в области традиционной геодезии.

Рассмотрим конкретный пример. Офицер военно-топографической службы получил задание выполнить привязку ракетной позиции (речь идёт о 70-х годах прошлого века). Не вдаваясь в тактические тонкости, в переводе на обиходный язык, это означало определить координаты места, откуда будет производиться пуск ракеты. Всё отмеченное происходило в рамках общевойсковых учений, и на выполнение боевой задачи было отведено 24 часа. Это в обстановке, приближённой к боевой, в повседневье на это уходило гораздо больше времени. Для выполнения поставленной задачи необходимо было проложить полигонометрический (теодолитный) ход, подобный, изображённому на рис. 52, который с обоих концов опирается на пару известных пунктов триангуляции. Только на рис. 52 ход состоит из 3 определяемых пунктов, а на конкретной местности, которая большей своей частью располагалось в лесу, пришлось наметить по просекам и тропинкам более 30 таких пунктов, один из которых закладывался в точке запуска ракеты. Это означало измерить более 30 углов и линий, которые в то время мерялись с помощью стальной 30-метровой ленты. Процессу измерений предшествовал поиск известных пунктов триангуляции, также надлежало выполнить рекогносцировку местности с тем, чтобы спроектировать местоположение определяемых пунктов и закрепить их на местности. В лесной труднопроходимой местности процесс измерений как углов, так и линий достаточно напряжённый, кропотливый, тяжёлый, а главное - ответственный. Ведь геодезисты, как и сапёры, не имеют права на ошибку, ибо в противном случае ракеты полетят не в ту сторону и не на то расстояние. Обработка измерений выполнялась не на компьютере, а на его прадедушке, механическом вычислительном устрой-

стве, называемом арифмометром (рис. 58).

Чтобы умножить, например, число 25 на 9, необходимо было на рычажках этого прибора установить множимое 25, а затем выполнить 9 полных полновесных оборотов механической ручкой этого чудо-прибора. Вы представляете, думаю, что не очень. Нынешнее поколение пользователей вычислительных средств привыкло к мониторам компьютеров, а не к механическим рычажкам арифмометра. Тем не менее, эти арифмометры имели место быть наяву, и именно с их помощью приходилось производить математическую обработку данных геодезических измерений. Теперь понятно, какую гигантскую работу пришлось произвести в процессе измерения 5-километрового полигонометрического хода, чтобы определить координаты точки ракетной позиции и при этом уложиться в 24 часа. Пересказ этого производственного эпизода преследовал единственную цель - показать, что сегодня для привязки той же ракетной позиции достаточно на джипе подъехать к точке привязки, установить на ней приёмник GPS и через несколько минут прочесть на экране этого приёмника координаты искомой точки. И это всё. Чувствуете разницу? Так что давайте разбираться с принципом работы этой замечательной навигационной системы под названием GPS .

Начнём с краткого исторического экскурса. Идея создания



Рис. 58. Компьютер и арифмометр

спутниковой навигации зародилась в конце 50-х годов прошлого столетия, когда в 1957 году в СССР был запущен первый искусственный спутник Земли. Более пятнадцати лет понадобилось, чтобы воплотить эту идею в жизнь. Сделали это в 1973 году специалисты Военно-Воздушных Сил США, которым удалось разработать систему спутниковой навигации, которую они называли NAVSTAR (Navigation Satellite providing Time and Range), что означает "навигационная спутниковая система, обеспечивающая измерение времени и местоположения". Первый спутник, входящий в эту систему, которая позднее была переименована в GPS, был выведен на орбиту в 1974 году, а последний, 24-й спутник - в 1993 году. Это количество спутников дало возможность покрыть навигацией практически всю поверхность Земли. Понятно, что в начальный период GPS использовался только в военных целях Министерства обороны США, поскольку система GPS предоставила уникальную возможность точного наведения ракет на объекты, находящиеся как на земле, так и в воздушном пространстве. В 1983 году президент США Рональд Рейган разрешил использование GPS в гражданских целях, но при этом, во избежание применения системы в оборонных целях, сигнал, полученный со спутников гражданскими пользователями, искусственно искажался и, таким образом, занижалась точность определения местоположения путём введения специального секретного алгоритма. Поистине историческим стало в 2000 году решение президента США Билла Клинтона, который специальным распоряжением, по сути дела, рассекретил систему GPS, предоставив обычным пользователям всей планеты получать точные навигационные параметры своего местонахождения. С этого момента и по сегодняшний день как прогрессивное человечество, так и простые обыватели широко используют американскую навигационную систему GPS для повседневного определения местоположения различных объектов. Несмотря на то, что американская GPS не единственная спутниковая система в мире, она по праву занимает ведущее место в этой области.

Какие же ещё навигационные системы функционируют в космическом пространстве? Это, прежде всего, система GLONASS (ГЛОНАСС) - глобальная навигационная спутниковая система. Эта система, разработанная в СССР в начале 80-х годов прошлого века, сегодня находится в ведении Министерства обороны России. В 1995 году правительство России спе-

циальным постановлением открыло систему для гражданского применения и международного сотрудничества. В то же время в Российской Федерации на использование спутниковых приёмников глобального позиционирования введены ограничения: для их применения необходима специальная лицензия. К сожалению, из 24 запущенных спутников системы ГЛОНАСС ещё несколько лет назад далеко не все из них находились в надлежащем рабочем состоянии. На сегодняшний день усилиями правительства России ГЛОНАСС функционирует бесперебойно и надёжно и составляет конкуренцию GPS. Совместная работа этих двух систем значительно расширяет возможности глобального определения местоположения.

Нельзя не упомянуть об ещё одной спутниковой системе, которая носит название GALILEO (ГАЛИЛЕО). В настоящий момент этот европейский проект спутниковой навигации находится в стадии разработки, которую осуществляет European Space Agency (Европейское Космическое Агентство). В отличие от американской GPS и российской GLONASS система GALILEO не контролируется ни государственными, ни военными учреждениями. Ожидается, что ГАЛИЛЕО войдёт в строй в 2013 году, когда на орбиту будут выведены 30 спутников. Вполне вероятно, что в ближайшие годы космические просторы будут бороздить уже 78 спутников американской GPS, российской GLONASS и европейской GALILEO.

Несмотря на наличие в мире трёх навигационных спутниковых систем, будем рассматривать именно GPS как наиболее эффективную и широко применяемую во всём мире. Итак, что же такое это магическое GPS? Прежде всего, расшифруем, наконец, эту аббревиатуру. На английском наречии это будет звучать как Global Positioning System, что в русском дословном переводе, будет звучать: *глобальная позиционная система* или система глобального позиционирования. Почему глобальная? Да потому, что эта система, позволяет определить координаты точки в любой точке земного пространства. Почему позиционная? Синонимом слова позиция является слово местоположение. Это удачно отражает главную цель системы - определить (позиционировать) место нахождения отыскиваемой точки на земной поверхности. И, наконец, слово система подразумевает, что в понятие GPS входит сочетание нескольких взаимоувязанных элементов. Эти элементы, называемые сегментами, подразделяются на космический, уп-

равляющий и пользовательский (рис. 59). *Космический сегмент*, являющийся основным, состоит из 24 навигационных космических аппаратов (спутников), которые движутся по 6 круговым орбитам на высоте около 20 000 км и наклонены к плоскости экватора под углом 55° .

Управляющий (контрольный) сегмент управляет спутниками, по сути контролируя их функционирование в космическом пространстве. Задачей этого сегмента является отслеживание спутников и обеспечение их данными о параметрах орбит и времени. На практике управляющий сегмент представляет собой пять наземных станций, четыре из которых исполняют функцию слежения, т.е. управления спутниками, а пятая станция наделена полномочиями контроля. В реальности первые четыре станции постоянно получают данные со спутников и передают эту информацию на пятую, контрольную станцию, которая, с учётом соответствующей корректировки, отправляет принятые данные обратно спутникам. *Пользовательский сегмент* это, по большому счёту, вы, уважаемые коллеги, при условии, конечно, что у вас в руках имеется приёмник GPS, а ещё это геодезисты, геологи, военные, пилоты, штурманы, туристы, охотники, объединяемые одним словом – пользова-

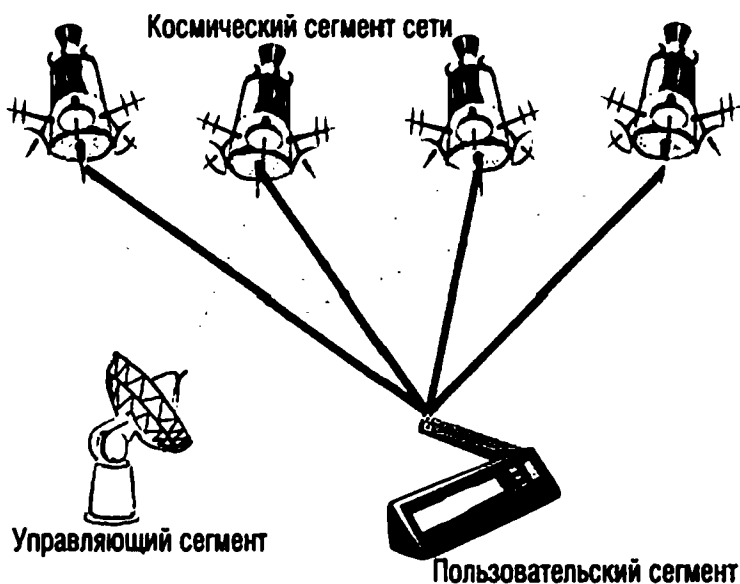


Рис. 59. Сегменты GPS

тели, имеющие непреодолимое желание определить своё местоположение.

Всё это предисловие к объяснению принципа работы рассматриваемой глобальной системы позиционирования GPS. Безусловно, все рассмотренные нами сегменты GPS изобилуют сложными радиотехническими, информационными, вычислительными и микроэлектронными устройствами, являющимися продуктами современных высоких технологий. Несмотря на это принцип, на котором основано действие GPS, достаточно прост: местоположение объекта на земной поверхности определяется путём измерения расстояний от этого объекта до исходных точек. В качестве исходных точек выступают искусственные спутники Земли, излучающие радиосигналы, которые пользователь принимает на специальный приёмник. Возникает вполне закономерный вопрос, каким образом становятся известны координаты спутников. В специальном центре управляющего сегмента на основе уточнённых элементов орбит и коэффициентов поправок спутниковых часов составляется так называемый альманах, в который входят вычисленные путём непростых расчётов по законам небесной механики, теоретической астрономии и высшей геодезии координаты спутников. Методика этих расчётов выходит за пределы курса, но надо запомнить, что эти координаты

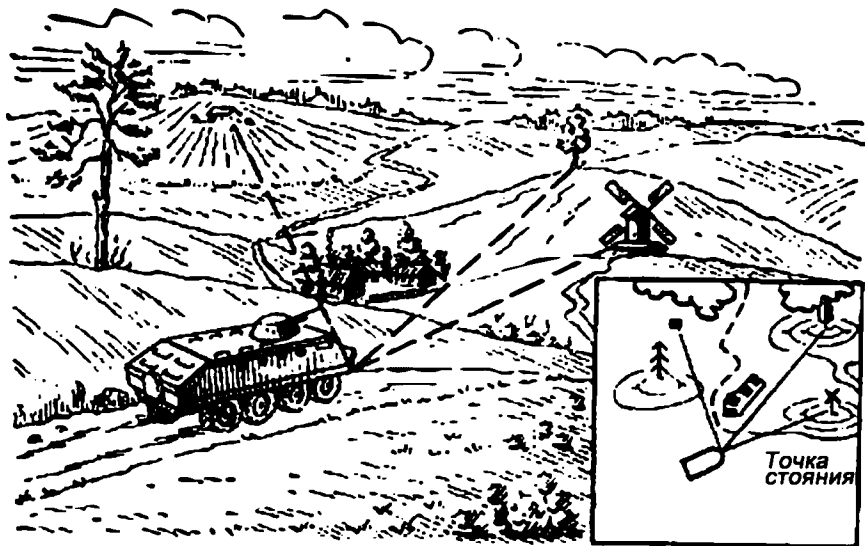


Рис. 60. Обратная линейная засечка

передаются по каналам станций связи на спутники. Здесь важно понять, что спутники выполняют роль точно координированных точек отсчёта. А если так, то принцип определения местоположения точки базируется на хорошо известной в геодезии простой *обратной линейной засечке*. Придадим отмеченному понятию геометрическую интерпретацию.

Представьте командира танка, которому необходимо определить по имеющейся у него карте своё местоположение. Для этого необходимо сориентировать карту, например по компасу, затем выбрать на местности, по меньшей мере, три хорошо видимых предмета, которые чётко опознаются на карте (рис. 60).

В нашем случае это будут дом, отдельно стоящее дерево и ветряная мельница. Далее направляют обычную линейку или, лучше сказать, визируют линейкой таким образом, чтобы условный знак дома на карте и настоящий дом на местности находились на одном направлении. После выполнения этой несложной процедуры вдоль линейки прочерчивают линию и, не меняя ориентировки карты, т.е. не сдвигая её, поочерёдно направляют ту же линейку на дерево и на мельницу, после чего снова проводят линии. Точка пересечения трёх построенных направлений на карте и будет являть собой место стояния искомого танка.

Обратимся снова к нашим спутникам, являющимся основной составляющей GPS. Спутники, придерживаясь вышеприведенной аналогии, будут представляться как известные ориентиры: дом, дерево и мельница. Рассмотрим три варианта получения сигнала от спутников. В первом из них мы получи-

Объект где-то на поверхности сферы

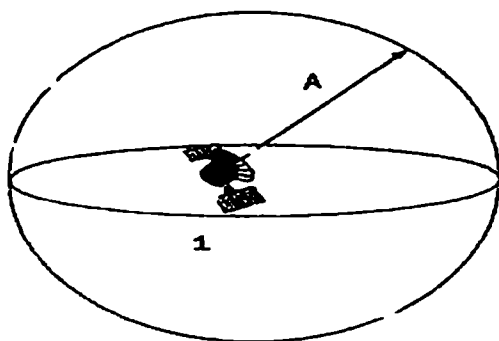


Рис. 61. Один спутник

ли сигнал только от одного спутника (рис. 61).

Предположим, что расстояние A от спутника, находящегося в центре сферы, до приёмника GPS пользователя известно. Тогда этот пользователь может, по сути дела, находиться в любой точке этой воображаемой сферы, радиус которой равен A .

Во втором случае сделаем допущение, что на орбите появился ещё один спутник. Расстояние от него до пользователя составит величину B . Область нахождения пользователя с приёмником GPS сейчас будет определяться окружностью, полученной в результате пересечения сферы радиусом A со сферой, отдалённой от спутника принятым расстоянием (радиусом) B . В этой опции пользователь, вероятно, будет размещаться в какой-нибудь точке, находящейся на окружности, заштрихованной на рис. 62. Выделим, наконец, ещё одну версию, когда на небосклоне возникнет третий спутник, который отдалён от пользователя на расстояние C . Из рис. 63 следует, что удалось свести возможное местоположение пользователя приёмником GPS до двух точек. Не вызывает сомнения, что эти две точки получаются в результате пересечения новой сферы, радиусом, равным C , с окружностью, образованной сферами радиусами A и B . Одна из этих двух точек пересечения рассматриваемых сфер, сформированных тремя различными дистанциями от пользователя до спутников, не при-

Объект где-то на окружности

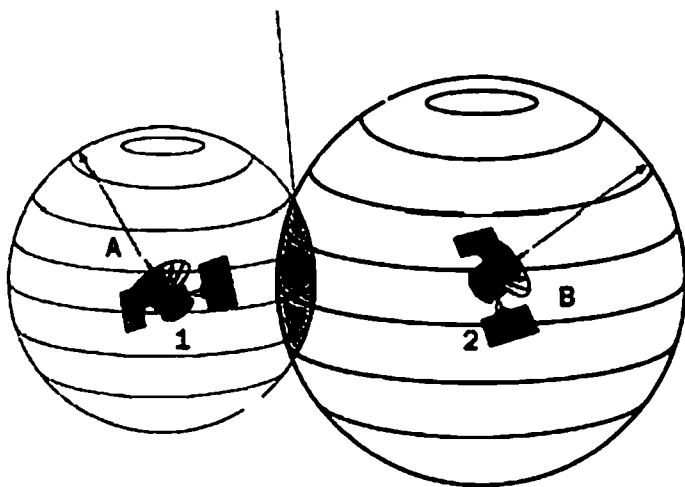


Рис. 62. Два спутника

надлежит земной поверхности, где должен располагаться приёмник GPS: она, как правило, находится либо выше Земли, либо внутри её тела, что не соответствует реалиям. Поэтому эта точка отбрасывается, а компьютерные устройства приёмников GPS автоматически определяют истинную точку, в которой находится этот приёмник.

Итак, не вызывает сомнения, что определение местоположения пользователя GPS определяется решением обратной засечки, геометрический смысл которой был продемонстрирован выше. Чтобы сказанное стало совсем понятным, осталось только окутать его в математическую оболочку. Таким образом, исходными данными являются известные пространственные координаты $X_A, Y_A, Z_A, X_B, Y_B, Z_B, X_C, Y_C, Z_C$ трёх спутников А, В, С и известные расстояния S_A, S_B, S_C от места нахождения приемника (пользователя) до этих спутников. Необходимо определить координаты X_M, Y_M, Z_M точки М, в которой находится пользователь с приёмником GPS. Суть обратной засечки в нашем случае состоит в том, что наш приёмник "за-секает" спутники, местоположение которых известно в любой заданный момент времени. В реальности не пользователь за-секает спутники, а наоборот спутники посылают радиосигналы на приёмник. Но в любом случае пересечение сигналов от трёх спутников однозначно определяет местоположение

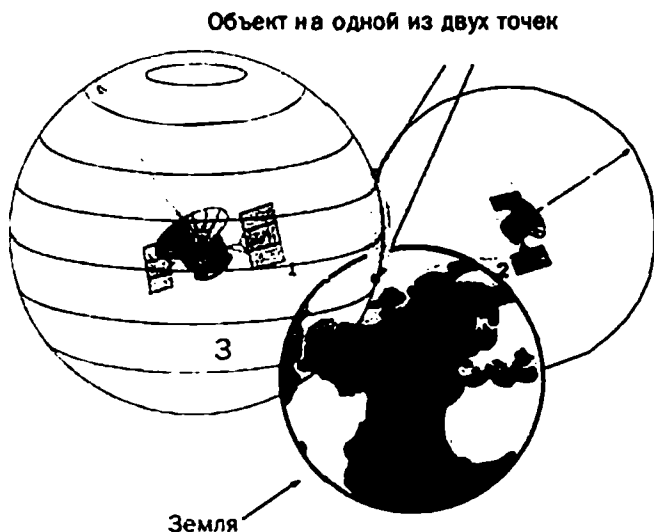


Рис. 63. Три спутника

пользователя на Земле. Покажем это.

Не считите за труд, дорогие коллеги, снова вернуться в родную школу и вспомнить простую, но очень уж популярную формулу из курса аналитической геометрии, посредством которой вычисляется расстояние между двумя точками. Применительно к нашему случаю эта формула выразится следующими соотношениями:

$$S_A = \sqrt{(X_M - X_A)^2 + (Y_M - Y_A)^2 + (Z_M - Z_A)^2}, \quad (102)$$

$$S_B = \sqrt{(X_M - X_B)^2 + (Y_M - Y_B)^2 + (Z_M - Z_B)^2}, \quad (103)$$

$$S_C = \sqrt{(X_M - X_C)^2 + (Y_M - Y_C)^2 + (Z_M - Z_C)^2}. \quad (104)$$

Не составляет особых проблем и затруднений решить классическую систему трёх уравнений с тремя неизвестными, определив при этом пространственные координаты местоположения приёмника GPS в точке М.

Однако это далеко не всё. Возникает вопрос, а откуда нам известны расстояния S_A , S_B , S_C от приёмника до спутников.

Всё более чем просто. Где бы ни определялось расстояние, под землёй, на земле или в космосе, суть от этого не меняется: оно находится как произведение какой-нибудь скорости и времени. В нашей версии это скорость распространения радиоволн и время прохождения радиосигнала от спутника к приёмнику. В спутниковой навигации измеряются не координаты, как полагают некоторые пользователи, а именно время, все же остальные параметры вычисляются электронными и компьютерными устройствами. В сущности, в измерении времени прохождения радиосигнала и заложена сама идея GPS. Разумеется, время должно измеряться достаточно точно, и поэтому GPS предполагает суперточное измерение времени, основанное на атомном стандарте частоты. В соответствии с этим, на каждом из спутников установлено 4 комплекта атомных часов, отсчитывающих время с наносекундной точностью. Наносекунда - это 10^{-9} секунды, т.е. 0,000000001 сек. или миллиардная часть секунды. Тут погрешность в 0,01 секунды вносит ошибку в расстояние всего-навсего в 3 000 км, а погрешность в одну наносекунду искажает расстояние на 30 см, что для геодезических целей просто недопустимо. Стоимость бортовых спутниковых атомных часов чрезвычайно

дорога и составляет 100 000 долларов. Поэтому устанавливать такие атомные часы в каждом пользовательском приёмнике является непозволительной роскошью и вряд ли представляется рациональным и целесообразным. При таком повороте событий число пользователей приёмников GPS исчислялось бы крайне ограниченным контингентом, банковский счёт которых выражается астрономическими цифрами. Исходя из этого, приёмники GPS оборудуются не атомными, а простыми кварцевыми часами. Но при этом в огромной степени ухудшается точность измерения времени. Что же делать? Был найден простой и в то же время оригинальный выход из этой, казалось бы, тупиковой ситуации. Суть его состоит в том, что если, как мы уже знаем, три точных измерения времени (по трём спутникам) однозначно определяют положение точки в трёхмерном пространстве, то четыре неточных измерения (по четырём спутникам) позволяют исключить относительное смещение шкалы времени приёмника. Что же это за смещение шкалы времени? Дело в том, что при измерении времени прохождения радиосигнала появляется проблема точного выделения момента времени, когда этот сигнал вышел из спутника. Для этого спутники и приёмники синхронизируют так, чтобы они генерировали один и тот же код точно в одно и то же время. Как же это работает? Да не так уж и сложно. Следует сравнить два кода: код, принятый со спутника, и код, сгенерированный приёмником. Сдвиг одного кода относительно другого и будет соответствовать времени прохождения сигнала от спутника до приёмника. Теперь возвращаемся к нашим спутникам, чтобы разобраться, в чём преимущество четырёх спутников над тремя и что они улучшают в плане измерения времени. Поскольку расстояние является функцией измеренного времени, то, поверьте, ничего не случится, если будем дальности от приёмников до спутников выражать не километрами, а секундами. В нереальной ситуации, когда и спутники, и приёмники снабжены атомными часами и промежуток времени измеряется предельно точно, нам вполне хватило бы приёма радиосигнала от трёх спутников. Но в действительности часы в приёмниках не такие совершенные, как на спутниках. Предположим, что часы в приёмниках запаздывают на одну секунду. Что же произойдёт в этой, можно сказать, катастрофической ситуации? Не вызывает сомнения, что ошибка в одну секунду в перерасчёте на расстояние вызовет в его определе-

нии громадную погрешность, и, самое главное, местоположение приёмника, равно как и его пользователя, будет определено неправильно. В геометрической интерпретации три окружности, радиусы которых образованы ошибочными расстояниями (их называют "псевдодальностями") до трёх спутников, не пересекутся в одной точке. Но оказывается не всё так страшно, и предсказываемую катастрофу в определении местоположения можно избежать. На самом деле, когда часы приёмника запаздывают или спешат, т.е. наши окружности не пересекаются в одной точке, то компьютер, вмонтированный в этот приёмник, фиксирует этот прискорбный факт. Программное обеспечение этого компьютера позволяет выявить, насколько отстают или спешат часы в приёмнике и ввести (отнять или прибавить) в измеренные "псевдодальности" (в ошибочно измеренные интервалы времени) одну и ту же поправку. В нашем случае, при запаздывании часов в приёмнике на одну секунду, необходимо вычесть эту секунду (поправку) от каждого измеренного времени. Вышеозначенный всесильный компьютер, по сути дела, корректирует (исправляет) время во всех измерениях до тех пор, пока не обнаружит, что наши окружности пересекутся в одной точке. Осталось только разобраться, каким образом компьютер определяет эту точку пересечения. Для этого снова обратимся к аналитической геометрии. Преобразуем полученные нами формулы (102), (103) и (104) с учётом появления на горизонте четвёртого спутника, не забывая при этом, что расстояние определяется как скорость, умноженная на время. Тогда будем иметь следующие соотношения:

$$V(t_A \pm \Delta t) = \sqrt{(X_M - X_A)^2 + (Y_M - Y_A)^2 + (Z_M - Z_A)^2}, \quad (105)$$

$$V(t_B \pm \Delta t) = \sqrt{(X_M - X_B)^2 + (Y_M - Y_B)^2 + (Z_M - Z_B)^2}, \quad (106)$$

$$V(t_C \pm \Delta t) = \sqrt{(X_M - X_C)^2 + (Y_M - Y_C)^2 + (Z_M - Z_C)^2}, \quad (107)$$

$$V(t_D \pm \Delta t) = \sqrt{(X_M - X_D)^2 + (Y_M - Y_D)^2 + (Z_M - Z_D)^2}. \quad (108)$$

В приведенных формулах V - скорость распространения радиоволн; t_i - ошибочное время (псевдодальности) прохождения сигнала от спутника до приёмника; Δt - поправка за ошибочный отсчёт времени; $(t_i \pm \Delta t)$ - исправленное (точное) вре-

мая прохождения радиосигнала. Известными величинами здесь по-прежнему будут являться координаты $X_A, Y_A, Z_A, X_B, Y_B, Z_B, X_C, Y_C, Z_C, X_D, Y_D, Z_D$ четырёх рассматриваемых спутников и ошибочное время прохождения сигнала от спутников до приёмника t_A, t_B, t_C, t_D . Неизвестные параметры представлены координатами местоположения приёмника X_M, Y_M, Z_M и поправкой Δt , которую мы вводим в неправильно измеренное время. Уравнения (105)–(108) представляют собой алгебраическую классику, когда число уравнений (у нас их четыре) совпадает с числом неизвестных. Решая эту систему, в которую входят данные, полученные с четырёх спутников, мы находим не только координаты местоположения приёмника (это можно было определить и с помощью трёх спутников), а и точное время прохождения радиосигнала от спутников до приёмника, что позволяет, в конечном итоге, безошибочно определить координаты отыскиваемого местоположения.

Необходимо учитывать, что, с одной стороны, координаты точки М: X_M, Y_M, Z_M получены в WGS-84 системе отсчёта в прямоугольной пространственной (трёхмерной) геоцентрической (начало отсчёта - центр Земли) системе координат (см. главу II). При этом X, Y - оси эллипсоида лежат в экваториальной плоскости, а ось Z - лежит перпендикулярно X, Y осям и проходит через географический северный полюс. С другой стороны, в GPS-практике позиция всё той же точки М пересчитывается в эллипсоидальные координаты, параметрами которых являются широта φ и долгота χ , а также высота h . По большому счёту, как, впрочем, и по малому, координаты точек земной поверхности приурочены к принятому в данной стране локальному (референц) эллипсоиду. Поэтому программное обеспечение GPS-аппаратуры, в конечном итоге, перевычисляет координаты в системе всемирной системы WGS-84 в плоские координаты x, y системы координат данного государства. Что же касается *эллипсоидальной* высоты h , полученной из спутниковых измерений, то следует помнить, что это - высота точки земной поверхности, отсчитанной по *перпендикуляру* от поверхности эллипсоида, заданного в системе WGS-84. В то же время, в реальной практике высоты, называемые *ортометрическими*, измеряются по *отвесной линии* от *геоида*, т.е. относительно среднего уровня моря. Отвесная линия к геоиду и перпендикуляр к эллипсоиду не совпадают. Из рис. 2 (глава 1) понятно, что общепринятая в геодезии и картографии ортометрическая высота

может быть получена как разность между эллипсоидальной высотой и превышением геоида над эллипсоидом (ондуляцией). Не вдаваясь в комментарии, которые не входят в наш вводный курс, отметим только, что ондуляции рассчитываются по специальной методике посредством модели геоида. Зная ондуляции и полученные, с помощью спутниковых измерений, эллипсоидальные высоты, без труда переходим к таким родным и привычным для нас, обозначенным на всех топографических картах ортометрическим высотам.

До сих пор, коллеги, мы говорили о *глобальной* системе позиционирования GPS в *глобальном*, т.е. всеобъемлющем аспекте. Сейчас введём некую простую классификацию этой системы, разделив приёмники GPS на навигационные и геодезические. **Навигационные приёмники** – это устройства, устанавливаемые в автомобилях и мобильных телефонах, на самолётах, кораблях, и просто приёмники индивидуального пользования, размещённые в руке пользователя. В принципе, навигационные GPS предназначены не то чтобы для бытового, а, скажем, для повседневного хозяйственного использования для определения местоположения индивидуума. Например, с помощью GPS-навигатора автомобилист перемещается из известной ему точки А в неизвестную точку В, турист точно определяет своё местоположение в горах, а рыбак безошибочно находит речную протоку, где в прошлый раз у него был удачный лов. Навигационные приёмники обеспечивают устойчивое определение текущих координат с точностью до десятков метров (10–30 м) в течение нескольких секунд, они просты в эксплуатации и портативны. Такие приёмники недорогие (средняя стоимость их не превышает 100 долларов) и поэтому доступны для среднестатистического покупателя.

Считаю своим долгом напомнить вам, уважаемые дамы и господа, что мы находимся не в туристском походе, не на рыбалке, не за рулём шикарного внедорожника, а, образно выражаясь, в геодезическом пространстве. И ещё позвольте, коллеги, ещё раз акцентировать ваше внимание на то, что, книгу, которую вы заканчиваете читать, изучать или, если хотите, штудировать, красной нитью пронизывает идея создания топографической карты. Именно поэтому необходимо принять к сведению, что в геодезических работах GPS-измерениями определяются координаты и высоты ситуационных точек местности для целей картографирования территории. Понятно, что

здесь нас ни в коей мере не устроят навигационные приёмники, которые определяют координаты, в лучшем случае, с метровой точностью, и нам, вероятно, понадобятся приёмники, позволяющие производить более точные измерения. Такие приёмники существуют, и их принято называть **геодезическими**. Эти приёмники имеют более сложную конструкцию, наворожены системой непростых радиоэлектронных устройств и цена их составляет уже не сотню долларов, а десятки тысяч зеленых американских купюр.

Существуют два основных режима определения координат с использованием GPS-аппаратуры: *абсолютный (автономный)* и *относительный*. Совсем не хочется, коллеги, вводить вас в непростые теоретические дебри спутниковой измерительной методологии, но познакомить с режимами действия пользовательских приёмников я просто обязан. Поэтому делаем глубокий вдох, приводим мозговые извилины в рабочее состояние и начинаем вникать в суть спутниковых измерений. В несколько упрощённом изложении технология абсолютного и относительного режимов измерения сводится к числу пунктов (точек), над которыми устанавливаются спутниковые приёмники, а значит и к количеству этих приёмников. Если абсолютный режим предполагает использование одного пункта, на котором помещается один приёмник, то относительный режим подразумевает уже применение нескольких спутниковых приёмников, один из которых устанавливается на геодезическом пункте с известными координатами. Прежде чем разобраться, как получаются координаты местоположения в этих двух режимах, необходимо ввести два новых термина: *кодový* и *фазový* способы измерений. Что такое код? Более благозвучными синонимами этого понятия являются слова: правило, адрес или шифр. В нашем случае под кодом мы будем понимать спутниковый сигнал, в котором зашифровано местоположение спутника, т.е. координаты его нахождения. По сути дела, это даже не координаты, а расстояние от спутника до приёмника, а ещё точнее, время прохождения этого сигнала от того же спутника до антенны пользователя. На практике это выглядит следующим образом: кодový сигнал содержит передаваемую каждые шесть секунд, так называемую, *временную метку*. Называется она временной потому, что на этой метке подписано время, когда сигнал покидает спутник. Приёмник, в свою очередь, воспринимает посланный сигнал, распознавая спутник, считывает времен-

ную метку и, таким образом, определяет время прохождения сигнала от спутника до приёмника. Что происходит дальше, уже известно: по измеренному времени компьютерное устройство вычисляет расстояния до спутников, а на их основе – координаты определяемой точки. К сожалению, когда кодовый радиосигнал проходит через ионосферу (слой заряженных частиц на высоте от 120 до 200 км), а затем через атмосферу, которая формирует все климатические изменения, он получает значительные искажения. Эти малоприятные факторы вносят погрешности в измеренное время, и, как следствие, координаты местоположения определяются с точностью десятков метров. На основании вышеизложенного подчеркнём, что именно кодовый способ приёма спутникового сигнала является принципиальной и неотъемлемой частью абсолютного режима GPS-измерений, который используется в навигационных приёмниках, и поэтому точность определяемого местоположения относительно невысока, хотя, с другой стороны, вполне приемлема для поставленных целей.

Решение геодезических задач требует значительно более высоких точностей определения координат местоположения. Для получения сантиметровой и даже, в определённых случаях, миллиметровой точности на помощь приходит фазовый способ, который получил ещё название способа высокоточных измерений. Слово фаза ассоциируется с понятиями: момент, время или полоса. Применительно к GPS *фазу колебания спутникового сигнала* можно рассматривать как величину, можно сказать, полосу, которая показывает, какая часть колебания прошла с начала процесса, т.е. с момента исхода сигнала от спутника. Измеряемой величиной здесь является мгновенная разность фаз между сигналом спутника и сигналом генератора приёмника, т.е., по сути дела, измеряется не столько время распространения сигнала, сколько, на самом деле, сдвиг фаз колебаний несущей частоты, излучаемой спутником за это время. *Разностный фазовый* способ измерения спутникового сигнала приурочен именно к относительному режиму, под которым понимается определение местоположения одного (неизвестного) пункта относительно другого (известного) исходного пункта. В сущности, названный относительный режим, предполагающий одновременную установку двух приёмников на этих пунктах, базируется на упомянутом фазовом способе, который позволяет, в конечном итоге, получить с точностью

не менее 1 см разность координат базового вектора, направленного отрезка между исходным и неизвестным пунктом. Понятно, что по полученному приращению координат компьютер легко определит координаты неизвестного пункта. В противовес сказанному, точность координат при *кодовом способе*, который составляет основу абсолютного режима работы приёмника, в лучшем случае может составлять несколько метров. Чтобы окончательно не запутаться в приведенной терминологии, настоятельно рекомендуется запомнить два следующих мнемонических трафарета: абсолютный режим - кодовый способ - навигация и относительный режим - фазовый способ - геодезия.

Тут необходимо коснуться терминологии и ввести ещё два новых определения. Дело в том, что в относительном режиме позиционирования различают два метода спутниковых измерений: статический и кинематический. Сущность этих методов станет понятной, если перевести смысл этих слов с греческого языка: статика означает "неподвижный", а кинематика, наоборот, - "движущийся". В этом, собственно, и заключается принцип измерений в соответствии с этими методами. Если при *статических измерениях* участвующие в сеансе приёмники находятся в неподвижном состоянии, то при *кинематических измерениях* один из приёмников (referenc-приёмник) постоянно находится на исходном (известном) пункте, а второй (rover-приёмник) - находится в движении, т.е. перемещается с одного неизвестного пункта на другой. Статический метод измерений применяется в геодезии в основном при измерениях, требующих высокой точности получения координат. При этом используются точные геодезические приёмники, а сами измерения выполняются на исходном и определяемых пунктах фазовым способом (по фазе несущей частоты спутникового сигнала). В статических определениях могут использоваться несколько известных (базовых) пунктов. Например, при наличии четырёх приёмников GPS, два из них устанавливаются на двух геодезических пунктах, координаты которых известны с высокой степенью точности, а оставшиеся два приёмника - на определяемых (неизвестных) пунктах. Измерения на базовых и определяемых пунктах должны выполняться в одно и то же время, сам процесс измерений в зависимости от требуемой точности занимает несколько часов. При этом приёмники, которые тщательно центрируются над точкой, координата

ты которой они определяют, принимают сигналы от пяти и более спутников. Измерения производят в несколько приёмов и продолжаются до тех пор, пока число спутников и геометрия их расположения (эти характеристики просматриваются геодезистом на дисплее приёмника) не обеспечат требуемую точность позиционирования. В свою очередь, *кинематический метод* позволяет получать координаты точек в короткие промежутки времени. При этом вначале статическим методом определяют координаты первой точки. Таким образом, происходит привязка подвижного приёмника к базовому: этот процесс называется *инициализацией*. Затем, не прерывая измерений, передвигают приёмник и устанавливают поочерёдно на вторую, третью, четвёртую и т.д. точки, координаты которых хотят определить.

Чтобы не запутаться в дебрях словообразований (методы, способы, режимы) и лучше понять технологию относительно-го режима позиционирования, рассмотрим, так называемый (опять не могу обойтись без нового термина), *дифференциальный регламент* измерений посредством GPS, который приурочен как к статическому, так и к кинематическому методам спутниковых измерений.

Каким образом реализуются на практике дифференциальные измерения, нам поможет разобраться рис. 64. На нём под индексами 1, 2, 3, 4 изображены спутники, 5 - геодезический (базовый) пункт с известными координатами, на котором устанавливается контрольный приёмник, 6 - переносной приём-

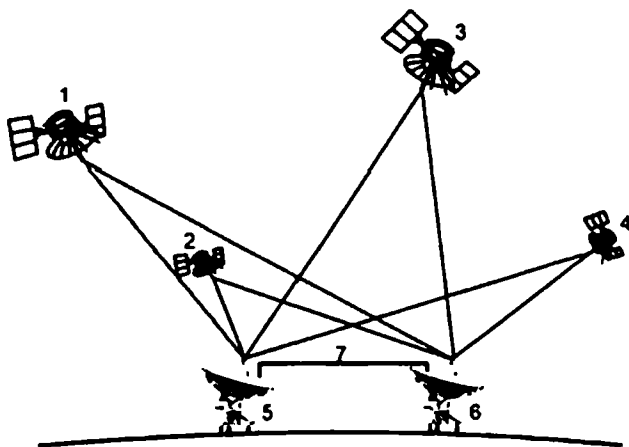


Рис. 64. Дифференциальные измерения

ник пользователя (в нашем случае, геодезиста, который перемещает его от одного неизвестного пункта к другому), 7 - канал связи. Как же происходит процесс измерений? По сути дела, "умный" компьютер контрольного приёмника в пункте 5 сравнивает координаты, полученные по измерениям со спутников 1, 2, 3, 4, с известными координатами этого же исходного пункта 5. По результатам сравнения координат контрольный приёмник формирует поправки, которые по каналу связи 7 попадают в передвижной приёмник, находящийся, в данном случае, в пункте 6, координаты которого определяются уже с учётом этих поправок. Почему измерения называются дифференциальными? Как известно, в переводе с латинского слово *differentia* означает не что иное, как разность. На самом деле, именно разности измеренных расстояний до спутников с расстояниями, вычисленных по известным координатам спутников и исходного пункта 5, и образуют указанную выше *поправку*, которую мы и называем *дифференциальной*. Почему же дифференциальный регламент спутниковых измерений получил столь широкое распространение? Да потому, что, к примеру, при геодезических работах инженерного назначения, расстояния между пунктами 5 и 6 небольшие и, как правило, не превышают одного километра. Не вызывает сомнения, что это расстояние 5–6 ничтожно мало по сравнению с расстояниями от пунктов 5 и 6 до, например, спутника 3 (рис. 63), которые составляют более 20 000 км. Очевидно, что при фактическом равенстве расстояний 3–5 и 3–6, погрешности (они могут быть значительными) их измерений будут практически одинаковы. В соответствии с вышеизложенным при вычислении дифференциальной поправки как разности расстояний, разности погрешностей, входящие в эти расстояния, будут равны нулю. Таким образом, дифференциальные измерения будут свободны, по крайней мере, от систематических ошибок, сопровождающих эти измерения. Именно в этом состоит сущность и достоинство дифференциального регламента спутниковых измерений.

Вернёмся к уже упомянутому кинематическому методу GPS-измерений. Обратим внимание, что все рассмотренные до сих пор методики спутниковых измерений предполагали их постобработку. Приставка "пост" означает, что вычисление координат определяемых пунктов осуществляется уже после производства измерений в камеральных (офисных) условиях.

Сейчас к слову "кинематика" добавим выражение "реальное время" или, как говорят современные "юзеры" (компьютерные пользователи) "онлайн". Это позволит познакомиться с ещё одной спутниковой технологией, которая предоставит возможность получить координаты определяемой точки на дисплее приёмника прямо в поле, например, через пять секунд после начала измерения с точностью в несколько сантиметров. Совокупность приёмов и методов получения точных координат, определяющих эту технологию, называется RTK (Real Time Kinematic), что в дословном переводе означает, как уже было сказано, "кинематика в реальном времени". В практической реализации принцип измерений посредством RTK достаточно прост (рис. 65).

Один из приёмников (referenc) устанавливается на точке с известными координатами. Такая точка называется базовой станцией. Дальнейший процесс происходит в соответствии с ранее описанным дифференциальным регламентом спутниковых измерений: базовый приёмник передаёт поправки в координаты, определяемые передвижным (мобильным) приёмником (rover) в измеряемых точках местности, посредством средств связи, в частности радиомодема или мобильного (сотового) телефона. Следует принять к сведению, что зачастую точки с известными координатами могут располагаться на значительном расстоянии от измеряемых точек, а с увеличением расстояния между referenc и rover, точность измерений существенно снижается. Выше говорилось о том, что дифференциальные измерения позволяют скомпенсировать или, по крайней мере, свести к минимуму погрешности, которые входят в измерения, поступающие в базовый и передвижной приём-



Рис. 65. Принцип работы RTK

ники. Это происходит, однако, только при условии близкого расположения точек, в которых находятся эти приёмники. С точки зрения экономии финансовых средств сегодня на вооружении практикующего геодезиста находятся не два приёмника (reference и rover), а один. Современная концепция спутниковых измерений, выполняемых в реальном времени, позволяет это сделать. Эта концепция предполагает при производстве RTK-измерений использовать сеть постоянных (базовых) станций GPS. Что же представляет собой постоянно действующая станция? Конечно же, это не столь же массивное сооружение, как железнодорожная, автобусная или электростанция. На самом деле, постоянная станция занимает площадь не более одного квадратного метра и представляет собой жёстко закреплённую спутниковую антенну и приёмник, который посредством спутников непрерывно определяет свои координаты. Несколько одновременно работающих постоянных станций практически ежесекундно и, разумеется, круглосуточно определяют своё положение одна относительно другой и образуют своеобразную виртуальную сеть. Все постоянные станции, входящие в эту сеть, безостановочно транслируют сигналы (измерения), полученные от каждого из спутников, на центральный пункт управления, называемый сервером (рис. 66). Огромный поток спутниковой информации, принятый сервером от базовых станций, тщательно анализируется, подвергается совместной обработке и позволяет оценить качество измерений.

В сущности, принцип работы постоянных (базовых) станций заключается в возможности их управления из единого

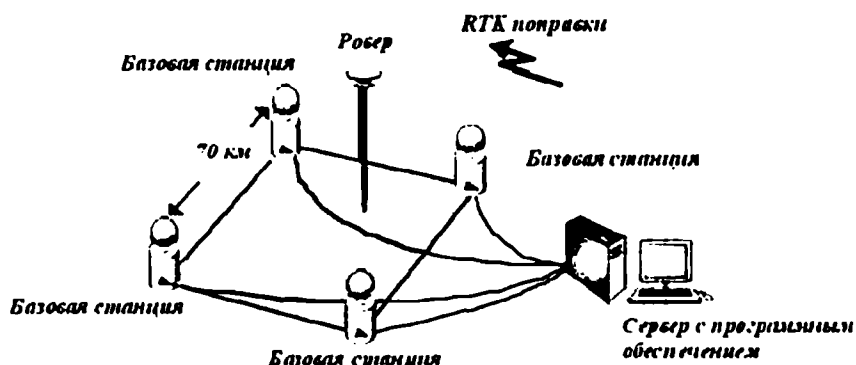


Рис. 66. Постоянные (базовые) станции

вычислительного центра. Главным фактором здесь является покрытие значительной территории *корректирующей информацией*, необходимой для точного определения координат определяемых пунктов геодезической сети или ситуационных и рельефных точек для картографирования местности в реальном времени. Смысл этой коррекции заключается в том, что rover-приёмник, установленный на точке, координаты которой необходимо определить, передаёт на сервер данные о своём местоположении на основе полученных им спутниковых сигналов. Сервер в свою очередь посредством соответствующего программного обеспечения автоматически переключает rover-приёмник на ближайшую к нему базовую станцию для приёма поправок в координаты, которые этот приёмник ранее получил на основе измеренных дальностей до спутников. Связь rover-приёмника с сервером осуществляется с помощью радиомодема, мобильной телефонной связи или интернета. Для получения координат определяемых точек с точностью 2–3 см необходимо, чтобы расстояние между базовыми станциями не превышало 70 км, а расстояние между базовой станцией и определяемой точкой, на которой установлен rover-приёмник, составляло менее 10 км. В заключение отметим, что во всём мире за полученный сервис, за оказанные услуги принято платить. В нашем случае услугой считается предоставление пользователю (геодезисту) возможности практически мгновенно получить на rover-приёмнике точные координаты интересующей его точки, не вкладывая средства для покупки оборудования для собственной базовой станции.

Итак, в заключительной главе детально разобрана концепция и принципы функционирования географической информационной системы (GIS) и глобальной позиционной системы (GPS). Следует подчеркнуть, что современные GPS-технологии предоставили геодезистам возможность осуществлять картографирование территории новыми, фантастическими методами. Одним из таких эффективных методов является спутниковая кинематическая топографическая съёмка в режиме реального времени RTK. Произошло невероятное: в результате производства такой съёмки появилась возможность прямо в полевых условиях с точностью в несколько сантиметров получать координаты и высоты точек местности, которые мы, в конечном итоге, хотим показать на карте. Ещё совсем недавно при создании опорных геодезических сетей строили

высокие сооружения (сигналы и пирамиды) с целью создания видимости между измеряемыми пунктами, чтобы, в конце-концов, по довольно непростой программе произвести измерения. Затраты на постройку этих пунктов намного превышали стоимость самих измерений. Топографическая съёмка, которая производилась с указанных выше пунктов геодезической опоры, также предусматривала видимость между этими пунктами и точкой ситуации, в которой помещались рейка или отражатель, и на которые наводилась зрительная труба теодолита или электронного тахеометра. С появлением спутниковых технологий кропотливый процесс создания прямой видимости между измеряемыми точками совсем не обязателен. Само собой разумеется, что канул в Лету и сложный, очень трудоёмкий процесс астрономических определений. А зачем, когда в несравненно более короткое время посредством GPS-измерений можно получить те же самые астрономические широту, долготу и азимут. Методы спутниковой геодезии позволили в предельно сжатые сроки выполнять суперточные измерения и, как следствие этого, производительность измерений повысилась как минимум на порядок, т.е. в десять раз и примерно на такой же порядок снизилась трудоёмкость работ.



Рис. 67. Топографическая RTK-съёмка

Ведь для производства RTK-съёмки, выполняемой в реальном времени, достаточно установить, как уже отмечалось, rover-приёмник с радиомодемом на съёмочную точку (рис. 67) и в течение нескольких секунд получить на контроллере спутникового прибора точные координаты этой точки.

Конечно, не всегда процесс спутниковых измерений проходит идеально. Иногда в полосе приёма спутниковых сигналов нет необходимого количества спутников, порой геометрия расположения спутников не удовлетворяет требованиям нормативных документов, случаются радиопомехи, препятствующие прохождению информации, исходящей от радиомодема. Однако все названные факторы не влияют на качество измерений, поскольку вовремя выявляются и, в конечном итоге, могут только задержать их выполнение на непродолжительное время. Существенным недостатком GPS-измерений считается невозможность производства спутниковой съёмки в условиях плотной городской застройки. Тут имеют место ограничения свободного обзора той части небосвода, где в момент измерения находятся наблюдаемые спутники, и количество спутников, от которых принимает сигналы приёмник, недостаточно для качественного измерения. Кроме того, приёмник GPS, установленный на городской улице, окружают каменные и бетонные здания и сооружения, густолиственные кроны деревьев, столбы линий связи и электропередач и т.д. и т.п. Перечисленное является препятствием для прохождения спутниковых сигналов и фактически экранирует их, тем самым существенно затрудняя производство координатных определений при спутниковой топографической съёмке. Выходом является комбинированный метод топографической съёмки (рис. 68), предусматривающий рациональное сочетание

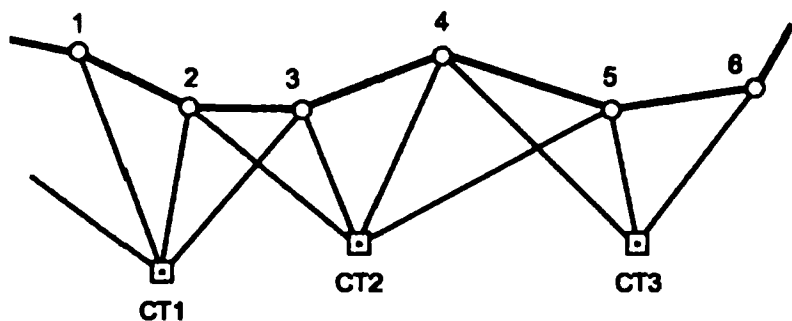


Рис. 68. Комбинированная спутниковая съёмка

спутниковых методов с конвенциональными.

Под конвенциональными измерениями с применением электронных тахеометров подразумевается полярный метод съёмки, которому уделено в этой книге достаточно внимания, и который, справедливости ради, ещё никто не отменял. Суть комбинированного метода заключается в том, что даже в стеснённых условиях большого города практически всегда можно найти место, в котором откроется часть небесной сферы, достаточной для того, чтобы приёмник GPS принял сигналы от необходимого количества спутников. Именно в таких местах и закладываются опорные пункты (станции) СТ1, СТ2, СТ3 (рис. 68), координаты и высоты которых определяются методами GPS-измерений, а не методом полигонометрии. Затем на этих точках вместо GPS-приёмника устанавливается электронный тахеометр, зрительная труба которого наводится на съёмочные точки 1, 2, 3, 4, 5, 6, координаты и высоты которых получают в соответствии, по уже изученному нами в VI главе, полярному методу топографической съёмки.

Заключение

Итак, уважаемые дамы и господа, разрешите поздравить вас с прибытием нашего виртуального геодезического поезда к месту назначения. На всём пути его следования мы с вами благополучно проехали все станции, каждая из которых открывала нам тайны и секреты геодезической науки в общем и этапы и пути создания топографической карты в частности. По мере неторопливого движения нашего поезда каждая страница этой книги постепенно и ненавязчиво вводила вас, дорогие читатели, в не приземлённую, а, скорее, в самую земную профессию, в увлекательную и романтическую специальность, называемую *г е о д е з и я*. Профессия создаётся не сама по себе, её генерируют люди, работающие в ней, и в то же время профессия формирует людей и закладывает в них цельное, свойственное данной специальности мировоззрение. Может быть, совсем не случайно, будучи в молодости геодезистами и землемерами, Джордж Вашингтон, Томас Джефферсон и Авраам Линкольн стали президентами США, а Леонид Брежнев занимал высший в советской иерархии пост Генерального секретаря Центрального комитета коммунистической партии Советского Союза. Ведь не секрет, что превалирующими чертами геодезиста являются аналитический склад ума и логическое мышление, организаторские способности и коммуникабельность, ответственность и исполнительность. Этот список необходимых качеств, которыми должен обладать инженер-геодезист, могут продолжить слова моего учителя доктора технических наук, профессора А. В. Буткевича: "Кого привлекает романтика далёких путешествий, открытие земель, где не ступала нога человека, теоретические выводы и сложные расчёты, кто интересуется астрономией и движением небесных светил, строением Земли и непростыми процессами, происходящими в её недрах, кто не боится ни жары, ни холода, ни гор, ни пустынь, ни физики, ни математики, ни дифференциалов, ни интегралов, кто хорошо ориентируется по карте на местности, умеет плавать и скакать верхом на лошади, владеет оружием, водит автомобиль, - только те смогут освоить нелёгкую, но такую нужную народному хозяйству специальность инженера-геодезиста". Ещё один мой учитель, доктор

технических наук, профессор А. Л. Островский в своей книге "Моя жизнь в геодезии" писал "я люблю свою профессию, прежде всего за её многогранность, которая заключается в том, что геодезист, отработав определённое время на лоне природы в горах и пустынях, в лесах и в тундре, переходит к вычислительной обработке результатов своих измерений и вычерчиванию и составлению карт в уже кабинетных условиях. И как только надоедает вычислять и чертить, приходит время снова ехать в поле, к солнцу, ветрам, к речкам и озёрам. Снова новые встречи, новые знакомства, новые впечатления. Таким разнообразием в выполняемой повседневной работе не может похвастаться ни один инженер. Например, инженер-механик дни, месяцы, годы находится в одном и том же заводском цеху, и только в свободное от работы время встречается с природой и другими людьми".

Во время моего обучения в университете каждый учебный год завершался двухмесячной геодезической практикой. По завершению трудового дня, в течение которого осваивалась непростая наука реальных измерений с помощью различных геодезических и астрономических приборов, на лесной полянке пламенел яркий костёр, символизирующий романтичность и возвышенность людей, ступивших на тропу первопроходцев и изыскателей. Конечно же, в полуночной тишине звучали переливчатые гитарные аккорды, под которые мы пели нашу песню:

*Когда пылает костёр горячий,
Для песен мало так нужных слов,
Мы беспокойный народ бродячий
Геодезистов-полевиков.
О нас не пишут стихи, поэмы
И даже песни не пропоют.
Споёмте сами, ведь мы не немые,
Про наш нелёгкий, но нужный труд.*

Относительно поэмы, упомянутой в песне. Откровенно говоря, хотел я написать гимн геодезии, вместо этого у меня получилась книга, последнюю страницу которой вы, дорогие друзья, закроете через несколько мгновений. Возможно, что указанную поэму вы ощущаете между строк моего геодезического трактата, который я писал с большой любовью к гео-

дезической науке и глубоким уважением к вам, дорогие коллеги. А называл я вас коллегами не только потому, что по ходу моего повествования мы вместе с вами прикоснулись к науке, называемой геодезией. Ведь коллеги - это не только товарищи по учёбе, а прежде всего сослуживцы, сотрудники, люди одной профессии. Именно поэтому я надеюсь, что немалая часть читателей, которые добрались до этой страницы, непременно захотят от азов геодезической науки, изложенных в этой книге, проникнуть на её сияющие вершины и, как следствие этого, дописать геодезическую поэму, в которой я не поставил точку. Творческих и созидательных успехов вам, уважаемые коллеги, на геодезическом поприще!

Перечень ссылок на рисунки в сети интернет, использованные в тексте книги

- | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Рис. 1. giscraft.ru | Рис. 25. geodesy-bases.ru | Рис. 49. geocaching.su |
| Рис. 2. dic.academic.ru | Рис. 26. edu.dvgups.ru | Рис. 50. lib4all.ru |
| Рис. 3. edu.dvgups.ru | Рис. 27. pppa.ru | Рис. 51. bestreferat.ru |
| Рис. 4. edu.dvgups.ru | Рис. 28. funds04.ipg | Рис. 52. mining-enc.ru |
| Рис. 5. genmalish.ru | Рис. 29. dvgups.ru | Рис. 53. geo-practika.ru |
| Рис. 6. nashkrai.kiev.ua | Рис. 30. kamenshik.com | Рис. 54. zommersteinhof.livejournal.com |
| Рис. 7. giscentr.icc.ru | Рис. 31. kamenshik.com | |
| Рис. 8. nashkrai.kiev.ua | Рис. 32. avelir.by | |
| Рис. 9. base1.gostedu.ru | Рис. 33. geodezia.ru | Рис. 55. disinfo.ru |
| Рис. 10. nelstad.ru | Рис. 34. lib4all.ru | Рис. 56. referat.ru |
| Рис. 11. bestreferat.ru | Рис. 35. dvgups.ru | Рис. 57. harmony.ru |
| Рис. 12. geodesy.ru | Рис. 36. textreferat.com | Рис. 58. geodesy.ucoz.ru |
| Рис. 13. edu.dvgups.ru | Рис. 37. gosthelp.ru | Рис. 59. moryak.biz |
| Рис. 14. edu.dvgups.ru | Рис. 38. docload.ru | Рис. 60. miltop.narod.ru |
| Рис. 15. pppa.ru | Рис. 39. geospherecenter.ru | Рис. 61. redbay.ru |
| Рис. 16. mygeog.ru | Рис. 40. tapemark.narod.ru | Рис. 62. redbau.ru |
| Рис. 17. orientirovanie.net | Рис. 41. edu.dvgups.ru | Рис. 63. redbay.ru |
| Рис. 18. edu.dvgups.ru | Рис. 42. outdoors.ru | Рис. 64. mobiles.org.ua |
| Рис. 19. craft-orienta.ru | Рис. 43. outdoors.ru | Рис. 65. geometer-center.ru |
| Рис. 20. geography.su | Рис. 44. dic.academic.ru | Рис. 66. geometer-center.ru |
| Рис. 21. injzashita.com | Рис. 45. geoid.ucoz.ru | Рис. 67. ciscokidz.com, phototimes.ru |
| Рис. 22. kartgeoburo.ru | Рис. 46. esline.ru | |
| Рис. 23. bse.sci-lib.com | Рис. 47. geoman.ru | |
| Рис. 24. voennizdat.ru | Рис. 48. cegeot.ru | Рис. 68. geo-garant.ru |

Содержание

Слово к читателю	4
-------------------------------	----------

Глава 1

Что такое геодезия. Определение, понятия, концепция, стратегия, тактика и философия	8
--	----------

Глава 2

Геодезические аксессуары

Геодезический датум, системы координат, понятие о картографической проекции, концепция ориентирования направлений, прямая и обратная геодезические задачи, горизонтальное проложение линий	18
--	----

Глава 3

Топографические индикаторы

Что такое топография, топографические карты, масштабы карт и их точность, условные знаки, изображение рельефа, нахождение высот на картах, построение профиля местности, определение координат и углов ориентирования по карте	40
--	----

Глава 4

Геодезиометрия, или что измеряют в геодезии

Угловые измерения, линейные измерения, точность измерений, геодезические инструменты	58
--	----

Глава 5

Третья координата, или определение высот точек земной поверхности

Третья координата точек земной поверхности.

Сущность, способы и точность нивелирования.

Геометрическое нивелирование.

Тригонометрическое нивелирование 75

Глава 6

Топографическая съёмка местности

Понятие о картографировании и топографической
съёмке. Виды топографических съёмок.

Наземная топографическая съёмка.

Аэрофотосъёмка 84

Глава 7

Фундамент карты, или опорные геодезические сети

Что такое опорная геодезическая сеть.

Методы создания плановой геодезической опоры.

Методы создания высотной геодезической опоры 114

Глава 8

Геоинформационные и навигационные системы

Понятие о географических информационных
системах (ГИС). Общие сведения о глобальных

навигационных спутниковых системах (ГНСС) 137

Заключение 170

Перечень ссылок на рисунки в сети интернет,

использованные в тексте книги 172

ХОДОРОВ Самуил Наумович

ГЕОДЕЗИЯ – ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО

Введение в специальность

Руководитель проекта

К.Н. Уваров

Главный редактор

А.Н. Соловьев

Верстка

О.С. Лопатина

Подписано в печать 11.05.2013.

Формат 84x108/32. Бумага офсетная.

Гарнитура «Прагматика».

Объем 10 печ. л.

Тираж 1500 экз. Заказ №

Издательство «Инфра-Инженерия»

Тел.: 8(911)512-48-48

E-mail: Infra-e@yandex.ru

www.Infra-e.ru

***Издательство «Инфра-Инженерия»
приглашает к сотрудничеству авторов
научно-технической литературы.***