

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Евразийский национальный университет
им. Л. Н. Гумилева

Ж. М. Аукажиева, Е. Ж. Маусымбеков, Д. А. Джорашов

ВЫСШАЯ ГЕОДЕЗИЯ

Учебное пособие для специальности
5В071100 – Геодезия и картография

Астана 2016

Жанар Муратовна Аукажиева, Ерлан Жакенович Маусымбеков, Диас Аликович Джорашов. Высшая геодезия: Учебное пособие. – Астана: ЕНУ, 2016. – с. 119

Таблиц - 8. Рисунков - 25. Библиограф. – 21 наименование

Целью преподавания дисциплины «Высшая геодезия» является обучение будущих специалистов основам теоретических и практических знаний:

- о средствах и методах постановки высокоточных геодезических измерений на местности при создании, развитии и реконструкции государственных геодезических сетей и геодезических сетей специального назначения;

- о методах и способах математической обработки результатов полевых геодезических измерений в гравитационном поле Земли с целью определения планово-высотного положения точек в различных системах координат и высот;

- о геометрии земного эллипсоида;

- о форме, размерах и гравитационном поле Земли,

- о редуцированной проблеме,

- об организации геодезического мониторинга геодинамических процессов,

- о задании геоцентрической и референционной систем координат.

УДК 528
ББК 26.11

Эксперты:

Сагындык М. Ж. – к. т. н., доцент кафедры геодезии землеустроительного факультета КАТУ им. С. Сейфуллина

Кабдулова Г. А. – к. г. н., доцент, начальник отдела НК «Казахстан Гарыш Сапары»

Игильманов Ж. А. – к. т. н., профессор кафедры геодезии и картографии архитектурно-строительного факультета ЕНУ им. Л. Н. Гумилева

**Zhanar Muratovna AUKAZHIEYVA
Yerlan Zhakenovich MAUSSYMBEKOV
Dias Alikovich JORASHOV**

Higher Geodesy: Handbook. – Astana: ENU, 2016. – 119 pages

Задача дисциплины

Задачей изучения дисциплины «Высшая геодезия» является обучение студентов знаниям и умению:

Студент должен знать:

- методы построения государственных геодезических и специальных высокоточных сетей, методы их проектирования, создания и закрепления на местности;
- средства и методы постановки высокоточных геодезических измерений на местности при построении опорных геодезических сетей;
- методы определения фигуры Земли и ее гравитационного поля;
- методы математической обработки высокоточных плановых и высотных сетей;
- определение фундаментальных геодезических постоянных;
- задание геоцентрической и референцной систем координат, определение их взаимного положения и распространение на территории государств, регионов и поверхность Земли в целом;
- определение параметров геодинамических явлений.

Студент должен уметь выполнять:

- проектирование и предварительную оценку точности опорных геодезических сетей;
- высокоточные измерения горизонтальных углов, зенитных расстояний, высокоточное геометрическое нивелирование; выполнять соответствующие измерения при помощи современных приборов;
- математическую обработку результатов высокоточных геодезических измерений с использованием вычислительной техники.

1. Предмет и задачи высшей геодезии.

Основные понятия и определения. Основные методы изучения фигуры Земли и внешнего гравитационного поля.

Геодезия, как наука о Земле, пришла к нам из далекой древности и в переводе с греческого означает «землеразделение».

Начиная с XIX века, геодезию принято делить на собственно *геодезию* и *высшую геодезию*.

Главная задача геодезии - с помощью измерений на местности отобразить небольшие участки земной поверхности и ее детали на картах и планах.

Высшая геодезия изучает всю или значительную часть земной поверхности с учетом не параллельности отвесных линий, фигуры и гравитационного поля Земли.

Под фигурой Земли понимают физическую поверхность Земли.

Под гравитационным полем Земли понимают поле силы тяжести, являющейся равнодействующей силы притяжения и центробежной силы.

Изучение гравитационного поля Земли, как и других физических полей, в сущности, является геофизической проблемой. Однако потребности современной практики таковы, что, как правило, координатную и гравитационную проблему следует решать совместно как единую задачу о Земле.

К научно-техническим задачам высшей геодезии относятся:

изучение фигуры Земли, ее внешнего гравитационного поля и их изменений во времени;

разработка методов создания глобальных (в планетарном масштабе или в пределах континента) и национальных (на территории государства) опорных высокоточных геодезических сетей;

математическая обработка геодезических сетей, пространственное положение пунктов которых определяют, используя наземные астрономо-геодезические и гравиметрические измерения, спутниковые наблюдения, наблюдения космических летательных аппаратов, запускаемых к Луне и другим небесным объектам, лазерную локацию Луны, радиоинтерферометрические наблюдения квазаров;

установление единой системы геодезических координат;

геодинамические исследования: деформации земной коры и литосферных плит; изучение современных движений земной коры в сейсмоактивных районах с целью поиска предвестников землетрясений и последующего прогноза крупных землетрясений; изменения береговых линий и уровней морей и океанов; движение полюсов и неравномерное вращение Земли.

В последнее время резко возросли требования к точности построения геодезических сетей, что невозможно без научных разработок в области приборостроения и постановки высокоточных измерений.

Курс высшей геодезии состоит из трех основных разделов, дополняющих друг друга: основные геодезические работы, сфероидическая геодезия, теоретическая (физическая) геодезия.

В разделе «Основные геодезические работы» рассматриваются вопросы построения опорных геодезических сетей (плановых и высотных) в неоднородном

(реальном) гравитационном поле Земли, выполнение высокоточных геодезических измерений в этих сетях и методы их математической обработки.

В разделе «Сфероидическая геодезия» изучается геометрия земного эллипсоида, проектирование этой поверхности на плоскость, методы решения геодезических задач на поверхности эллипсоида, технология построения пространственных геодезических сетей на основе совместного использования спутниковых и традиционных геодезических измерений.

«Теоретическая геодезия» занимается разработкой теоретических основ и методов решения научных задач высшей геодезии. Она рассматривает вопросы теории потенциала силы тяжести, гравиметрии, определения фундаментальных геодезических постоянных, геодинамических исследований и других задач.

Основные понятия и определения

При изучении фигуры Земли сначала определяют форму и размеры некоторой модели Земли, поверхность которой проста и удобна для решения на ней разнообразных задач геодезии и картографии и наиболее полно характеризует в первом приближении форму и размеры реальной Земли. В высшей геодезии за такую модель Земли принимают *общий земной эллипсоид*. Это эллипсоид, определяемый следующими условиями:

- центр эллипсоида совпадает с центром тяжести Земли, а ее плоскость экватора с плоскостью земного экватора;
- сумма квадратов уклонов по высоте квазигеоида во всех точках от поверхности эллипсоида должна быть минимальна;
- объем эллипсоида должен быть равен объему геоида.

Общий земной эллипсоид, центр которого совмещен с центром масс Земли, ось вращения с осью вращения Земли, полярное сжатие, масса и угловая скорость совпадают с соответствующими параметрами Земли, называют *Нормальной Землей*. Параметры Нормальной Земли называются фундаментальными геодезическими постоянными, они стандартизируются международными соглашениями.

Для математической обработки астрономо-геодезических измерений и вывода пунктов геодезических сетей, а также для целей картографирования территорий отдельных государств применяют земной эллипсоид по размерам и ориентировке близко подходящий к геоиду на данной территории. Такой эллипсоид получил название *референц-эллипсоида*.

Итак, референц-эллипсоидом называется эллипсоид вращения с определенными размерами его полуосей, определенным образом ориентированный в теле Земли и принятый для геодезических работ в данной стране.

Первым эллипсоидом, параметры которого определены из градусных измерений был эллипсоид Деламбра (1800 г.). Он имеет только историческое значение. На его поверхности 1 метр был принят равным одной десятиmillionной части четверти дуги Парижского меридиана.

Референц-эллипсоиды, подходящие для различных территорий значительно различаются между собой. Первоначально в Германии применялся эллипсоид Бесселя (1841 г.), в США, странах Латинской и Центральной Америки, Кубе – эллипсоид Кларка (1866 г.), в ряде европейских стран эллипсоид Хейфорда (1910

г.), в бывшем СССР – эллипсоид Красовского. На настоящий момент имеется более двух десятков референц-эллипсоидов, каждый из которых оптимален лишь для определенной части Земли. Для территории республики Казахстан таким эллипсоидом является эллипсоид Красовского, рассчитанный в 1940 г.

Спутниковые геодезические системы позволяют наиболее точно определить параметры эллипсоида, аппроксимирующего земную поверхность и совместить его центр с центром масс Земли. В результате получается общий земной эллипсоид. Эллипсоид США WGS-84 (World Geodetic System 1984) в 1988 году принят как международный. В Российской Федерации национальная геодезическая система координат относится к поверхности эллипсоида ПЗ-90 (Параметры Земли 90 г.). В 1995 году геодезическая система ПЗ-90 была объявлена как геодезическая основа системы ГЛОНАСС.

Геодезические измерения выполняются на сложной физической поверхности Земли. Результатами измерений являются: длины линий, углы между направлениями, разности высот между точками земной поверхности. Однако эти результаты непосредственно выполненных измерений на поверхности Земли еще не являются конечными результатами геодезических работ. К последним относятся:

Координаты пунктов геодезических сетей, отнесенные к некоторой математически определенной поверхности Земли (поверхность земного эллипсоида);

Высоты пунктов над некоторой начальной поверхностью (близкой к поверхности морей и океанов);

Длины и азимуты геодезических линий между пунктами земной поверхности.

Эти результаты получают посредством вычислений, используя данные непосредственных измерений. В связи с этим приходится решать задачу перехода от непосредственно измеренных на физической поверхности геодезических элементов к координатам и высотам пунктов, вычисленным в определенной системе на поверхности относимости, математически обобщенной, но хорошо выражающей действительные размеры и форму Земли.

Строго говоря, истинная форма поверхности Земли с ее неровностями и непрерывным изменением во времени бесконечно сложна. Определить ее для каждого момента времени практически невозможно, да и не нужно. Непосредственные измерения, выполняемые на физической поверхности Земли, связаны с направлениями отвесных линий. Учитывая эту сущность и природу самих непосредственных измерений, в высшей геодезии неизбежно приходится иметь дело с уровенной поверхностью. *Уровенная* поверхность всюду горизонтальна, в любой точке ее нормаль совпадает с направлением отвесной линии (т.е. с направлением силы тяжести). Причем наибольший интерес представляет уровенная поверхность, находящаяся вблизи физической поверхности Земли. Достаточно точно реальную поверхность нашей планеты отображает геоид, в то же время он доступен для практического изучения. *Геоид* – это поверхность, которая приближенно совпадает со спокойной поверхностью Мирового океана и мысленно продолженная под материками так, что отвесные линии пересекают ее в каждой точке под прямым углом. Это уровенная поверхность. Можно доказать, что эта

поверхность замкнута, всюду выпукла, не имеет складок или каких-либо выдающихся неровностей. В то же время она (как и отвес) чутко реагирует не только на тяготение Земли и центробежную силу, но и на любые аномалии силы тяжести, вызванные неоднородностью земной коры. Задача изучения формы геоида состоит из двух частей: определение параметров эллипсоида, наиболее близкого к геоиду, и положения отдельных точек геоида относительно эллипсоида. В решении этих задач участвуют и гравиметрические измерения.

Советский ученый М.С. Молоденский в 1945 г. показал, что можно точно определить фигуру и гравитационное поле Земли, не основываясь на неопределенной поверхности геоида. Для решения поставленной задачи Молоденский М.С ввел нормальные высоты, определяемые по точной формуле и вспомогательную поверхность *квазигеоид*, который образуется, если отложить нормальные высоты от поверхности Земли. Поверхность квазигеоида совпадает с поверхностью геоида на морях и океанах и почти совпадает на континентальной части Земли. Максимальное отступление квазигеоида от геоида (2 м) наблюдается в горных районах.

Современное состояние развития высшей геодезии, ее значение и перспективы

Постановка и методика решения задач высшей геодезии постоянно развиваются и совершенствуются. Для успешного решения задач высшая геодезия тесно взаимодействует с геодезической астрономией, гравиметрией, теорией фигуры Земли, космической геодезией и др.

В высшей геодезии нашли широкое применение такие фундаментальные науки, как математика и физика.

Для решения задач, связанных с изучением Земли, как планеты, необходима тесная взаимосвязь с такими науками о Земле, как геология, геофизика, тектоника и др.

Решение научно-технических задач высшей геодезии имеет важное значение. Геодезические опорные сети являются исходной основой всех топографо-геодезических, проектно-изыскательских, инженерных, строительных и кадастровых работ. От сохранности, развития и точности геодезических опорных сетей, создающих единое координатное пространство, прямо зависит качество указанных работ. Высшая геодезия обеспечивает высокоточное задание пространственного положения объектов в ГИС, особенно с использованием таких средств, как спутниковые глобальные системы определения местоположения пунктов (GPS и ГЛОНАСС). Геодезические наблюдения за движениями земной коры показали, что первично возможно обнаружить деформационный предвестник землетрясений на десятки и более лет вперед, это позволит разумно готовиться к грядущему событию. Основным объектом, изучаемым в высшей геодезии, является внешняя динамика Земли. Путем наземных и спутниковых астрономо-геодезических и гравиметрических наблюдений определяются параметры, характеризующие движения полюса и центра масс, неравномерное вращение Земли, деформации земной коры и литосферных плит, изменения береговых линий и топографии поверхности морей и океанов, временные изменения фигуры Земли и ее гравитационного поля.

Поставленная в настоящее время задача восстановления и сгущения пунктов астрономо-геодезической сети (АГС) и повышения их точности обострила необходимость учета геодинамических процессов. При этом значительную роль могут играть фундаментальные пункты. Встает задача закрепления земной системы координат и гравитации на эпоху. Выше указанная система отсчета может быть закреплена редкой сетью астрономо-геодезических обсерваторий, равномерно расположенных на поверхности Земли. Приоритетными работами для решения этого вопроса являются лазерные спутниковые наблюдения, длиннобазисная радиоинтерферометрия, прецизионные определения силы тяжести и ее градиентов.

Геодезия должна быть ориентирована на решение прикладных задач в расчете на массового потребителя и фундаментальных научных задач современной геодезии. Геодезическое обеспечение должно создавать оптимальные условия для эффективного использования современных спутниковых методов измерений. Обеспечивать реализацию накопленного потенциала на основе традиционных методов геодезических измерений, а также огромного картографического материала, созданного в системе координат 1942 г.

Системы координат и высот, применяемые в высшей геодезии

Современное производство спутниковых и традиционных геодезических измерений требует использования различных систем координат.

Исходной системой координат, применяющейся в основном при геодезических и астрономических измерениях является геодезическая, определяемая принятым на данной территории референц-эллипсоидом. Координатными линиями в этой системе являются линии меридианов и параллелей. Координаты точек земной поверхности в этой системе координат задаются геодезической широтой B , геодезической долготой L , геодезической высотой H^G точки (рис.1).

Геодезическая широта B - это угол, образованный нормалью к поверхности земного эллипсоида в данной точке и плоскостью его экватора.

Геодезическая долгота L - это двугранный угол между плоскостью геодезического меридиана данной точки и плоскостью начального (Гринвичского) меридиана.

Геодезическая высота H - это высота точки над поверхностью земного эллипсоида, отсчитываемая по нормали к нему.

Геодезические координаты непосредственно измерены быть не могут, они относятся к абстрактной геометрической фигуре – эллипсоиду и их получают путем вычисления и суммирования приращений координат относительно исходного пункта государственной геодезической сети, имеющего координаты B_0, L_0, H_0 .

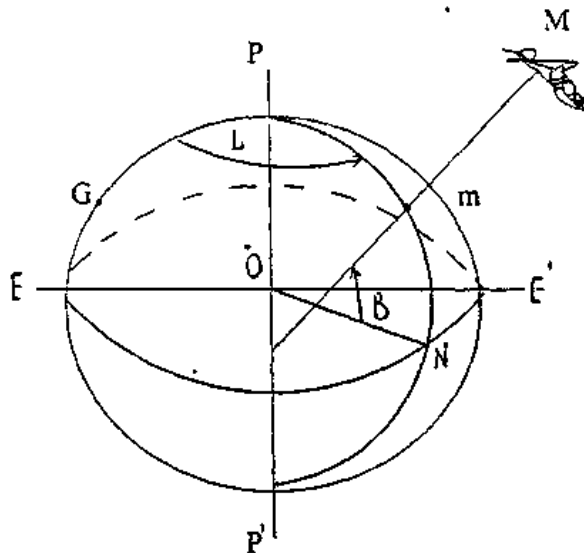


Рис. 1 – Система геодезических координат

На земной поверхности из наблюдений звезд определяют астрономические широты φ , долготы λ и азимуты.

Геодезические координаты B, L и H принято называть пространственными эллипсоидальными координатами, они образуют систему $G(B, L, H)$.

Систему координат, начало которой совпадает (почти совпадает) с центром масс Земли, называют геоцентрической.

В геоцентрической экваториальной системе оси координат задаются по отношению характерных точек земной поверхности или небесной сферы.

На рис. 2 ось $Z(z)$ направлена на северный полюс Земли. Если при этом ось X направлена в точку пересечения Гринвичского меридиана G с экватором, то получают систему прямоугольных пространственных координат X, Y, Z – система $S(X, Y, Z)$, которая участвует в суточном вращении Земли и остается неподвижной относительно точек земной поверхности. Данная система применяется в основном при спутниковых измерениях.

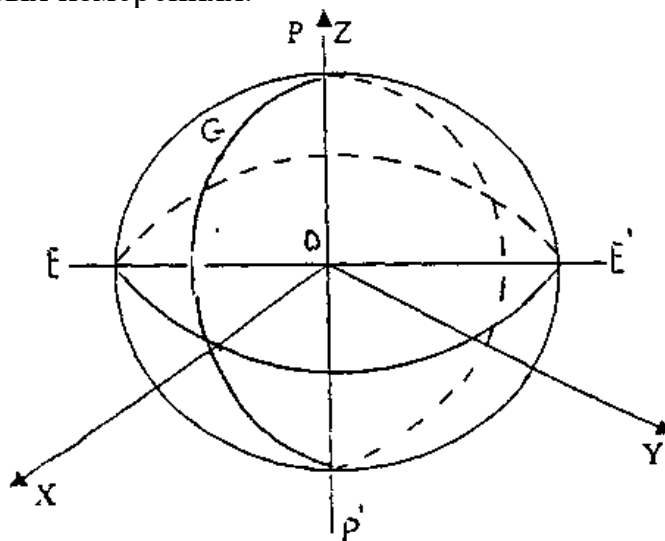


Рис. 2 – Геоцентрическая экваториальная система координат

Направляя ось x в точку весеннего равноденствия Υ , получим систему координат x, y, z , не связанную с суточным вращением Земли, удобную для изучения движения небесных объектов. Хотя ее начало перемещается в мировом пространстве, участвуя в годовом движении Земли вокруг Солнца и в движении Солнца в Галактике, это движение относительно далеких звезд можно считать инерциальным, т.е. равномерным и прямолинейным. Систему координат x, y, z назовем звездной геоцентрической равноденственной системой координат.

Использование геодезических координат создает существенные неудобства из-за громоздкости формул для решения геодезических задач на поверхности эллипсоида. Наиболее целесообразной, пригодной для обработки геодезических измерений на ограниченных территориях является проекция эллипсоида на плоскость, в которой координаты могут быть выражены в линейной мере.

В геодезических работах стран СНГ и Республики Казахстан используется зональная, конформная (равноугольная), поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса-Крюгера. В этой проекции земной эллипсоид делится на зоны (сферические двугольники) $6^\circ, 3^\circ, 1.5^\circ$ в зависимости от масштаба (рис.3).

Прямоугольные координаты x и y в пределах зоны вычисляются относительно экватора и осевого (центрального) меридиана. Осевой меридиан зоны изображается на плоскости прямой линией, принимаемой за ось x , ось y совпадает с изображением линии экватора (рис. 3).

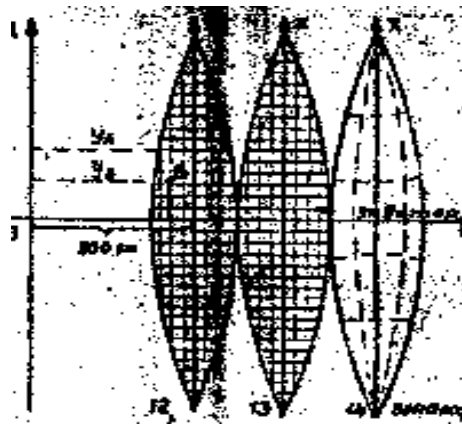


Рис. 3 – Система прямоугольных координат x и y

В пределах территории Республики Казахстан абсциссы положительны; ординаты положительные к востоку, отрицательные к западу от осевого меридиана. Для избежания отрицательных ординат, точкам осевого меридиана условно приписывают значение $y = 500000$ м с обязательным указанием впереди номера соответствующей зоны.

Осевые меридианы шестиградусных зон совпадают с центральными меридианами листов карты масштаба 1:1000 000. Порядковый номер зоны определяется по формуле

$$n = N - 30, \quad (1)$$

где N - номер колонны листа карты масштаба 1:1000 000.

Долготы осевых меридианов шестиградусных зон определяются по формуле:

$$L_0 = 6n - 3, \quad (2)$$

где n - номер зоны.

Система плоских прямоугольных координат x , y и высота $z = H$ образуют систему $P(x, y, z)$, которая используется при геодезических и топографических измерениях (как правило, координаты x , y и высота z взаимонезависимы).

Данные системы координат находят широкое применение в практике и теории геодезических, топографических и картографических работ.

Эллипсоидальные координаты B, L и H^G , прямоугольные пространственные координаты XYZ и плоские прямоугольные координаты x и y представляют систему геодезических координат. Она объединяет в единую систему данные геодезии, топографических съемок и картографирования на всей поверхности Земли. Координаты этой системы связаны с нормалью к поверхности земного эллипсоида, что удобно для изучения физической поверхности Земли и геоида.

Для определения положения какой-либо точки физической поверхности Земли относительно поверхности референц-эллипсоида кроме геодезической широты B и геодезической долготы L нужно знать еще третью координату – геодезическую высоту H^G .

Знание высот точек необходимо для изучения рельефа, при проектировании и строительстве всех инженерных сооружений. Высоты необходимы при редуцировании всех измеренных величин на поверхность земного эллипсоида.

Геодезическая H^G высота считается по нормали к поверхности референц-эллипсоида и определяется как сумма двух слагаемых

$$H^G = H_0 + \zeta, \quad (3)$$

где H_0 - нормальная высота данной точки физической поверхности Земли над поверхностью квазигеоида. Она составляет гипсометрическую часть геодезической высоты H^G и определяет в основном рельеф физической поверхности Земли. Гипсометрическая высота в зависимости от способа определения носит различные значения: ортометрическая, нормальная и динамическая.

Значение H_0 определяется геометрическим нивелированием.

Геоидальную часть ζ называют аномалией высоты. Она представляет собой отклонение поверхности геоида (квазигеоида) от поверхности эллипсоида, обусловленное в основном неравномерным распределением масс внутри Земли.

Основные методы изучения фигуры Земли и внешнего гравитационного поля.

Вопрос о том, какую форму имеет Земля, привлекал внимание многих мыслителей еще в глубокой древности. К мысли, что фигура Земли представляет собой тело, близкое по форме к шару, и, далее к эллипсоиду, пришли не сразу.

Измерения на земной поверхности для определения радиуса земного шара с давних пор называют градусными измерениями.

Основные этапы развития знаний о форме и размерах Земли.

Первое исторически достоверное определение размеров Земли принадлежит Эратосфену (3 в. до н. э.). В Голландии и Франции первые градусные измерения были проведены с применением метода триангуляции в XVII в. Определение радиуса Земли выполнялось на основании простейших геометрических зависимостей

$$\frac{S}{S_{1^\circ}} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{1^\circ}, \quad (4)$$

где S_{1° - длина дуги в 1° .

Основными методами изучения фигуры Земли являются:

1. Астрономо-геодезический метод, основанный на использовании геодезических и гравиметрических измерений на поверхности Земли.
2. Гравиметрический метод, базирующийся на измерении ускорения силы тяжести в различных точках земного шара.
3. Методы космической геодезии, основанные на использовании наблюдений искусственных и естественных спутников Земли, а также далеких космических объектов.

2. Геодезические сети Республики Казахстан, их назначение, схема и принцип построения

Опорная геодезическая сеть – система пунктов на земной поверхности, закрепленных специальными знаками и центрами, положение которых определено в общей для них системе координат и высот.

По геометрической сущности различают плановые, высотные и пространственные геодезические сети.

Плановые координаты пунктов определяются традиционными методами триангуляции, полигонометрии и трилатерации и их сочетанием. В высотной (нивелирной) сети получают высоты точек методами геометрического и тригонометрического нивелирования. Чаще встречаются сети, в которых в результате работ получают и координаты и высоты. Такие сети называются планово-высотными. В настоящее время при создании опорных геодезических сетей широкое распространение получила GPS-технология.

В пространственных сетях из обработки измерений определяют положение пунктов в трехмерном пространстве.

Геодезические сети могут создаваться как на малых, так и на огромных площадях земной поверхности.

Глобальная геодезическая сеть (фундаментальная астрономо-геодезическая сеть – ФАГС), покрывающая весь земной шар, создается методами космической геодезии с использованием ИСЗ.

Национальные геодезические сети подразделяются на государственную геодезическую сеть (плановая), государственную нивелирную сеть (высотную) и государственную гравиметрическую сеть.

Государственные геодезические сети всех трех видов строятся отдельно, но они тесно связаны между собой и дополняют одна другую.

Государственные геодезические сети предназначаются для решения следующих научных и инженерно-технических задач:

1. Закрепление единой геоцентрической системы координат, надежно связанной с инерциальной астрономической системой координат, изучение фигуры и внешнего гравитационного поля Земли, определения движения полюсов и неравномерности вращения Земли на каждую эпоху;

2. Геодезическое обеспечение картографирования обширных территорий суши, континентального шельфа, акваторий морей и Мирового океана, освоения космического пространства и космических средств определения координат и изучения природы, крупномасштабных съемок и инженерно-технических работ и изысканий;

3. Геодезическое обоснование динамики литосферы и водной оболочки Земли, прогноза геотектонических процессов глобального и регионального характера, изучения движения земной коры в пределах литосферных плит и отдельных регионов;

2. Эталонирование спутников – носителей координат и времени, наиболее точных систем наблюдения космических объектов, в том числе Луны и далеких радиоисточников.

Построение основных опорных геодезических сетей предшествует всем другим видам геодезических и картографических работ. Создают их путем проведения высокоточных астрономических, гравиметрических, угловых и линейных измерений, измерений превышений между пунктами, наблюдений ИСЗ, космических объектов (квazarов) с последующей обработкой полученных результатов.

Государственные геодезические сети являются главной плановой основой на городских и крупных промышленно-заводских территориях, а также на обширных территориях разработки сырьевых баз и полезных ископаемых.

Государственные геодезические сети служат основой для развития геодезических сетей сгущения в виде триангуляции, трилатерации, полигонометрии 1 и 2 разрядов, технического нивелирования, на основании которых в свою очередь выполняется развитие сетей съемочного обоснования в виде теодолитных ходов, микротриангуляции.

Общепринятым принципом построения государственной геодезической сети является принцип перехода от общего к частному, от более крупных и точных построений к мелким и менее точным детальным построениям, от высшего класса к низшему.

Государственная геодезическая сеть, созданная классическими наземными методами опирается на астрономо-геодезическую сеть, состоящую из крупных геодезических построений в виде полигонов. Измерения в ней выполнены с наивысшей точностью. Данная сеть принимается за исходную, и на ее основе строят геодезическую сеть второго порядка и т.д.

Схема построения ГГС Республики Казахстан

ГГС РК является составной частью государственной геодезической сети бывшего СССР, программа построения которой была разработана в послевоенные годы (после 1945 г.) и нашла свое отражение в Основных положениях 1954-1961 г.г. [].

Она состоит из нескольких сотен тысяч пунктов, равномерно распределенных по всей территории бывшего СССР, с точностью взаимного расположения в сетях 2-4 классов в 5-7 см. Создавалась она в соответствии с Инструкцией о построении государственной геодезической сети СССР []. Точность этой сети позволяет использовать ее для обоснования съемок вплоть до масштаба 1:2000 и крупнее.

Построение ГГС осуществляется в соответствии с принципом перехода от общего к частному. ГГС подразделяется на сети 1, 2, 3 и 4 классов, различающиеся между собой точностью измерений углов и расстояний, длиной сторон сети и очередностью последовательного развития. Основные методы построения - триангуляция, полигонометрия, трилатерация, их сочетание и спутниковые наблюдения.

В основе построения астрономо-геодезической сети (АГС) 1 класса лежит программа Ф.Н. Красовского, несколько уточненная и дополненная. АГС создана в виде полигональной астрономо-геодезической сети. Она образует систему полигонов периметром около 800 км, образуемых триангуляционными или по-

лигометрическими звеньями длиной каждое не более 200 км, располагаемыми в направлении меридианов и параллелей (рис.).

В месте пересечения звеньев измеряются базисные стороны. На обоих концах базисных сторон определяются пункты Лапласа, на которых выполнены определения астрономических широты, долготы и азимута.

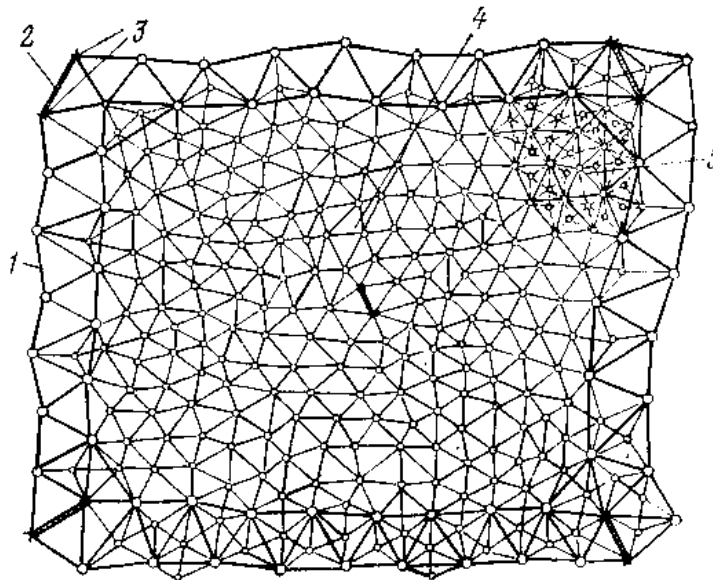


Рис. 4 – Схема полигона государственной геодезической сети

АГС совместно со сплошной гравиметрической съемкой предназначена для решения основных научных задач, связанных с определением размеров Земли, ее внешнего гравитационного поля, а также для распространения единой системы координат на всю территорию государства.

Геодезические сети 2 класса строились преимущественно в виде сплошных сетей треугольников, заполняющих полигоны 1 класса (рис.). Взамен триангуляции допускается построение сети методом полигонометрии 2 класса. Метод трилатерации при создании геодезических сетей 1 и 2 классов не применялся, вследствие, присущих ему недостатков.

Геодезические сети 2 класса служат для развития сетей сгущения последующих классов и геодезического обоснования всех топографических съемок и инженерных сооружений. Она может быть использована и для научных целей.

Геодезические сети 3 и 4 классов служат для последующего сгущения геодезических пунктов в сетях 2 класса до требуемой плотности. Сети 3 и 4 классов могут создаваться методами триангуляции, трилатерации и полигонометрии. Взамен триангуляции 3 и 4 классов может прокладываться сеть полигонометрии соответствующего класса. Полигонометрические ходы могут прокладываться в виде систем или одиночных ходов, опирающихся на пункты высшего класса. Пункты ГГС должны иметь высоты, полученные из геометрического или тригонометрического нивелирования.

Основные характеристики ГГС приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные характеристики ГГС

Показатели	Классы			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
Длина звена триангуляции (км)	200-250	-	-	-
Средняя длина стороны треугольника или стороны хода полигонометрии (км)	20-25	7-20	$\frac{5-8}{3-8^*}$	2-5
Относительная ошибка базисной (выходной стороны)	1/400 000	1/300 000	1/200 000	1/200 000

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Относительная ошибка измерения сторон в полигонометрии	1/300 000	1/250 000	1/200 000	1/150 000
Наименьшая величина угла в треугольнике	40°	20°	20°	20°
Допустимая невязка в треугольнике	3"	4"	6"	8"
Средняя квадратическая ошибка угла (по невязкам треугольника)	$\frac{0.7''}{0.4''}$	1"	1.5"	2"
Средняя квадратическая ошибка астрономических определений:				
Широты	0.3"	-	-	-
Долготы	0.3"	-	-	-
Азимута	0.5"	-	-	-

АГС Республики Казахстан состоит из рядов триангуляции 1 класса, образующих замкнутые полигоны, и сплошной сети триангуляции 2 класса, покрывающей всю территорию Республики. АГС РК является составной частью АГС бывшего СССР и включает в себя более 11400 пунктов 1 и 2 классов, 318 астропунктов и 224 базиса. Наблюдения сети выполнены в период 1928 – 1980 г.г.

АГС построена с требованиями Инструкции [] и удовлетворяет точностным характеристикам измерений.

Сплошная сеть триангуляции 2 класса имеет ряд отступлений от требований Инструкции [11] – окна разрыва. К отступлениям относятся следующие случаи: большая разность в длинах сторон треугольников, объяснимых характером рельефа местности и совпадением участков сети со значительными водными про-

странствами, из-за расположения на труднодоступной острой вершине и на государственной границе (пункты 2 класса определялись прямыми засечками, комбинированным способом). Сплошность сети 2 класса, в некоторых случаях была нарушена. Это вызвано высокогорьем, покрытым ледниками, с абсолютными высотами более 4500 м. Площадь на 1 пункт, в среднем составляет 133 км².

К особым построения АГС Казахстана отнесены космические базисы Алматы-Новосибирск и Сарапул - Омск, представляющие собой длины хорд, которые соединяют пункты космической триангуляции. Длины хорд получены проложением полигонометрических ходов 1 класса. Эти построения отнесены к особым потому, что ходы были проложены по сторонам сети треугольников существующих триангуляций 1 и 2 классов. Ход полигонометрии 1 класса Сарапул-Омск имеет протяженность 1274 км. Он разбит на 7 звеньев длиной 140-250 км. Ход полигонометрии Алматы-Новосибирск общей протяженностью 1483 км разбит на 8 звеньев длиной 140-250 км. Средняя длина стороны звеньев колебалась от 18.6 км до 21.9 км.

Основные направления в развитии ГГС РК.

В настоящее время необходимость построения более эффективной системы обеспечения геодезическими данными обуславливается развитием высокоэффективных современных спутниковых методов координатных определений на основе применения глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, в значительной степени меняющих технологию геодезических измерений и повышающих точность и оперативность их выполнения.

Высокая и однородная точность координат пунктов ГГС позволит использовать все пункты существующей геодезической сети в качестве опорных при использовании геодезического обеспечения методов систем GPS / ГЛОНАСС – измерений.

В последнее время во всем мире и в нашей стране интенсивно развивается цифровое картографирование. Использование современной высокоточной плановой основы не только в значительной степени повысит качество и точность цифровых топографических карт, но и позволит создавать цифровые карты в любой системе координат, включая местные.

Создание спутниковых сетей, обработка спутниковых данных на пунктах ГГС, создание и поддержание геоцентрической системы координат на уровне современных требований – все это задачи высшей геодезии на современном этапе развития ГГС.

Существующая сеть пунктов ГГС, созданная традиционными методами, не может в полной мере реализовать весь потенциал современных спутниковых методов. Для внедрения технологии спутниковых методов построения и развития высокоточной геодезической системы координат требуется построение специальных спутниковых геодезических сетей высшего класса точности: фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и высокоточной геодезической сети (ВГС).

Для максимальной эффективности последующего использования результатов построения спутниковых геодезических сетей в системе геодезического обеспечения в соответствии с технологией построения каждый пункт ФАГС и

ВГС представляет собой совокупность пяти пунктов, связанных между собой точными GPS - измерениями.

Главный пункт – рабочий центр, предназначенный для GPS – измерений, располагается в легкодоступных местах, с благоприятными условиями для наблюдений. Он связан точными GPS – измерениями с двумя ближайшими нивелирными пунктами главной высотной основы. Кроме того, рабочий центр и нивелирные пункты связаны спутниковыми измерениями с двумя соседними пунктами ГГС.

Связь с традиционными геодезическими сетями предусматривается также для развития спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1).

Связь с пунктами спутниковой геодезической сети высшего класса точности позволит уточнить ГГС 1-4 классов путем строго уравнивания или трансформирования с опорой на пункты ФАГС, ВГС и СГС-1, а главное определить координаты пунктов всей ГГС в единой геоцентрической системе координат. Таким образом, вся совокупность пунктов ГГС будет одновременно реализовывать две системы координат: государственную референсную и общеземную геоцентрическую.

При комплексном подходе к решению развития эффективной системы геодезического обеспечения в условиях широкого применения GPS – измерений необходимо рассматривать принципы установления не только общеземной геоцентрической системы координат, но и единой системы нормальных высот на основе совместного использования спутниковых, гравиметрических и нивелирных данных.

Высшее звено опорных геодезических сетей – совокупность пунктов ФАГС, ВГС и СГС-1 – построение высокоточной системы координат, которое невозможно без изучения процессов глобальной геодинамики. В настоящее время создана международная сеть пунктов постоянных наблюдений ИСЗ для целей геодинамики (IGS).

Принципы построения новой системы геодезических сетей в единой системе координат и высот отражены на рис.

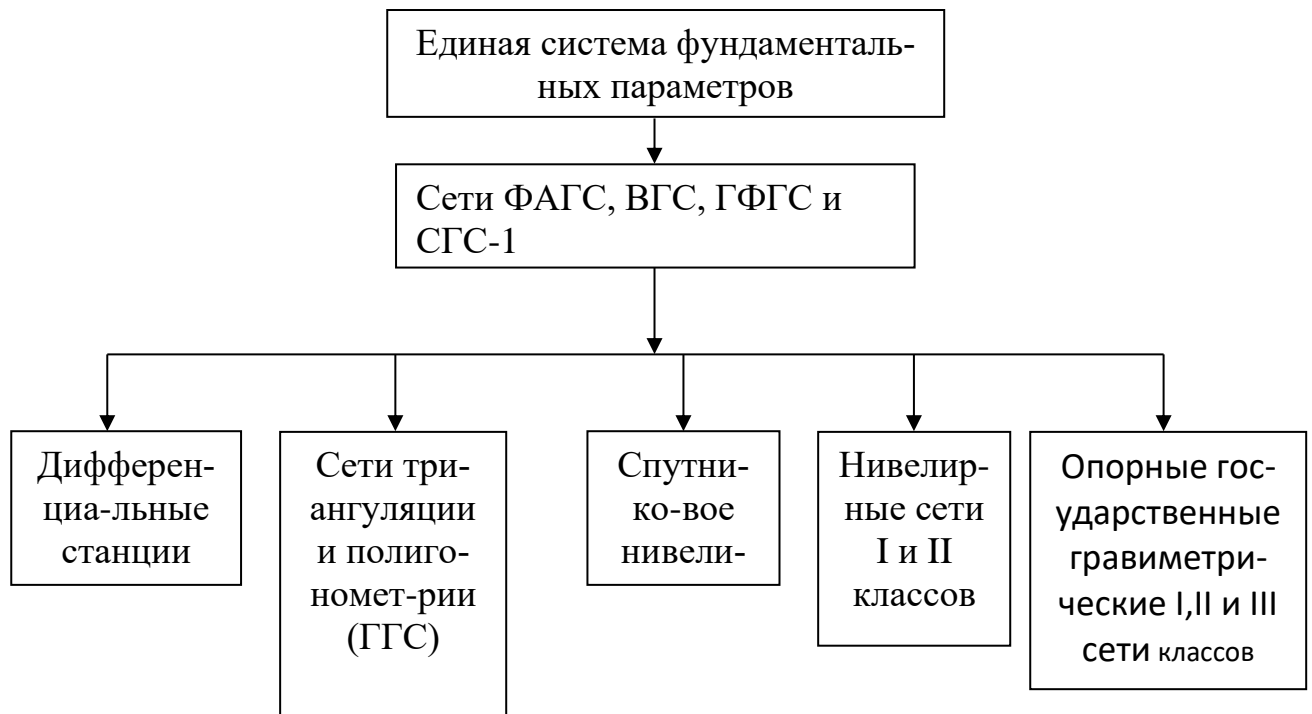


Рис. 5 – Принцип построения системы геодезических сетей

Требуемая плотность пунктов в государственных и специальных и необходимая точность построения этих сетей.

При решении вопроса о точности государственной геодезической сети исходят из следующего: сети старших классов, составляющие главную геодезическую основу государства строятся с наивысшей точностью, сети же низших классов ориентируют на обеспечение соответствующего масштаба съемки.

Государственная геодезическая сеть Республики Казахстан, являющаяся частью сети бывшего СССР делится на сети 1, 2, 3 и 4 классов и по точности рассчитана на проведение съемок масштаба 1: 2000. Ошибки положения пунктов государственной геодезической сети составляют 5-7 см.

Вопрос о необходимой густоте опорных пунктов, т.е. о количестве пунктов, обеспечивающих определенную площадь съемок, является важным при построении сети.

Требуемая плотность геодезических пунктов при общегосударственном картографировании территории страны зависит от масштаба топографической съемки, методов ее выполнения, а также от методов создания съемочного обоснования.

Площадь P , обеспечиваемую одним пунктом геодезической сети, при расстоянии s между смежными пунктами в сплошной сети, построенной из равно- сторонних треугольников, приближенно можно определить по формуле

$$P = \frac{\sqrt{3}}{2} S^2 \approx S^2, \quad (5)$$

где S - расстояние между смежными пунктами.

Плотность пунктов регламентируется соответствующими инструкциями [11]. Например, для съемок в масштабах 1:25 000 и 1:10 000 1 пункт на 50-60 км². Такая плотность создается, как правило, построением сетей 1, 2 и 3 классов.

Дальнейшее увеличение плотности пунктов плановой геодезической основы достигается развитием геодезических сетей 4 класса, сетей сгущения и съемочного обоснования, а также с помощью фотограмметрических способов сгущения. При отсутствии пунктов государственной сети на территории, охватываемой проектированием, в качестве планового геодезического обоснования для крупномасштабной съемки строят самостоятельные свободные сети.

Геодезические сети местного значения, как правило развивают на основе пунктов государственной геодезической сети; сети местного значения служат обоснованием для выполнения съемки земной поверхности в масштабах 1:5000 – 1:500 и для выполнения других видов маркшейдерских работ.

Геодезические сети местного значения включают в себя: аналитические (триангуляция) сети 1 и 2 разрядов, полигонометрические сети 1 и 2 разрядов. Характеристика геодезических сетей местного значения приведена в таблицах 2 и 3.

Таблица 2- Характеристика сетей триангуляции 1 и 2 разрядов

Разряд триангуляции	Длина сторон, км	Средняя кв. ошибка измерения углов (по невязкам треугольников)	Допустимая невязка в треугольниках	Средняя ошибка измерения базисных сторон	Средняя ошибка измерения базиса
1	2-5	±5.0"	20"	1:100 000	-
2	0.5- 3	±10.0"	40"	1:50 000	-

Таблица 3 – Характеристика полигонометрии 1 и 2 разрядов

Разряд	Предельная длина хода, км		Длина сторон		Ср. кв. ошибка измерения углов	Ср. кв. от. Ошибка измерения длин сторон	Допустимая относительная невязка хода
	Между твердыми пунктами	Между узловыми точками	Средняя	наименьшая			
1	5/8	3/5	200м	120 м	± 5"	1:20 000	1:10 000
2	4/6	2,5/4	150 м	80 м	±10"	1:10 000	1: 5 000

В районах, где триангуляция или полигонометрия 1 и 2 классов отсутствует, для обоснования съемок крупного масштаба разрешается развивать самостоятельные сплошные сети триангуляции 3 и 4 классов, имеющие не более двух базисных сторон, измеренных со средней квадратической ошибкой 1:200 000 и расположенных через каждые 20 – 25 треугольников. Полигонометрические сети

3 и 4 классов в этом случае строят в виде систем полигонов с периметрами: в сетях 3 класса не более 60 км, в сетях 4-го класса не более 35 км.

В случае отсутствия пунктов триангуляции, полигонометрии и трилатерации 1-4 классов для обоснования съемок земной поверхности и открытых разработок разрешается создавать самостоятельные сети 1 и 2 разрядов при условии, что площадь участков не превышает 500 кв. км для съемки в масштабе 1:5000 и 100 кв. км для съемки в масштабе 1: 2000.

Методы построения плановых опорных геодезических сетей

Астрономический метод – это самый древний метод определения местоположения пунктов. Сущность его заключается в определении на каждой избранной точке местности по небесным светилам астрономических координат – широты, долготы и азимута. При этом не требуется связи между пунктами. Он позволяет за сравнительно короткий срок построить густую сеть опорных пунктов в заданном районе земного шара.

Автономность и оперативность создания обоснования – основные достоинства этого метода. Однако точность его недостаточна.

Метод триангуляции, предложенный в 1614 году голландским ученым Снеллиусом, широко применяется во всех странах.

Сущность метода заключается в построении на местности системы треугольников, в вершинах которых измеряются все углы, кроме того, измеряется одна из сторон треугольников (базисная сторона). Элементами сети триангуляции могут служить не только треугольники, но и геодезические треугольники и центральные системы (рис. 6).

Основными достоинствами метода триангуляции является его оперативность и возможность использования в разнообразных физико-географических условиях, значительное количество избыточно измеренных углов и базисных сторон, позволяющих осуществлять надежный контроль всех измерений непосредственно в поле, а также повышать точность передачи азимутов и координат. При помощи триангуляционного ряда или сети геодезическое обоснование создается сразу на значительной площади. Метод триангуляции получил наибольшее распространение при построении государственных геодезических сетей.

Сущность метода полигонометрии состоит в следующем. На местности закрепляют систему геодезических пунктов, образующих вытянутый одиночный ход (рис. 6) или систему ходов, образующих сплошную сеть. Между смежными пунктами хода измеряют длины сторон, а на пунктах углы поворота. Азимутальное ориентирование полигонометрического хода осуществляют с помощью азимутов, определяемых или заданных, как правило, на конечных пунктах его, измеряя при этом примычные углы.

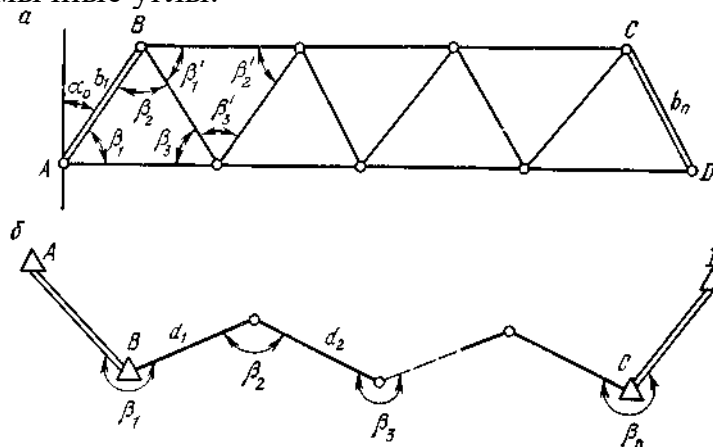


Рис. 6 – Методы построения плановых сетей: а) метод триангуляции, б) метод полигонометрии

В зависимости от того, как измерены линии хода, в полигонометрии различают:

1) траверсы – точные полигонометрические ходы, прокладываемые путем непосредственного измерения сторон хода инварными проволоками и углов – высокоточными приборами. Относительная ошибка измерения длин сторон в траверсах 1 класса 1: 200 000, средняя квадратическая погрешность измерения угла – 0.7".

2) параллактическая полигонометрия заключается в измерении на местности малых базисов, обычно равных длине инварных проволок (24 м) и малых параллактических углов, под которыми виден базис с концов определяемой линии. Относительная ошибка измерения длин сторон в 1: 30 000 - 1: 50 000.

3) Светодалномерная полигонометрия. Принцип определения расстояния заключается в измерении времени прохождения световыми или радиоволнами искомого отрезка.

Высокоточные светодалномеры позволяют определять расстояния с ошибкой 1: 400 000 - 1: 500 000, а радиодальномеры - 1: 100 000 - 1: 300 000, а радиодальномеры -

Метод трилатерации. Данный метод предусматривает создание на местности геодезических сетей либо в виде цепочки треугольников, геодезических четырехугольников и центральных систем, либо в виде сплошных сетей треугольников, в которых измеряются не углы, а стороны. Ориентирование сетей на местности выполняется с помощью азимутов сторон треугольников.

Сочетание трилатерации с триангуляцией, т.е. построение так называемых линейно-угловых сетей приводит к значительному повышению точности определяемых элементов сети, но требует больших затрат труда и средств, поэтому такой комбинированный метод построения опорных пунктов может быть применен только на отдельных, особо ответственных объектах, требующих геодезического обоснования высокой точности.

Сравнение полигонометрии с триангуляцией и трилатерацией показывает, что построение опорной сети методом полигонометрии экономически выгоднее за счет меньшей высоты специальных геодезических сооружений – сигналов. Недостатком полигонометрии являются: необходимость проведения на пунктах геодезической сети и угловых и линейных измерений, отсутствие надежного полевого контроля измерения углов и линий, менее точная чем в триангуляции, передача азимутов, неравенство продольных и поперечных смещений определяемых пунктов, узость полосы геодезического обоснования, создаваемого полигонометрическим ходом.

Радиогеодезический метод заключается в построении на местности сложных геометрических фигур, измерении их сторон и последующем вычислении координат пунктов, расположенных в вершинах, или непосредственном определении координат последних. Стороны длиной до 1000 км измеряют с помощью радиогеодезических систем, представляющих собою комплекс радиопередающих и принимающих устройств, позволяющих определять время распространения радиоволн и по нему – расстояние или разность расстояний до заданных точек. При этом для измерения больших расстояний часть радиотехнической аппа-

ратуры размещают на определяемых точках, часть – на специально оборудованных самолетах или других подвижных средствах.

Спутниковые методы создания геодезических сетей. Космическая геодезия изучает взаимное расположение точек земной поверхности и космических аппаратов, движущихся в гравитационном поле Земли. Существуют геометрические и динамические методы определения координат точек из наблюдений ИСЗ.

Геометрические методы космической геодезии основаны на наблюдении спутников, используемых как высокие подвижные цели.

В динамическом методе ИСЗ являются носителями координат.

В настоящее время созданы точные навигационные системы ГЛОНАСС (Россия) и GPS – США. Каждая из них состоит не менее чем из 18 спутников Земли и позволяет в любой момент времени и практически в любой части земного шара определять геоцентрические координаты с очень высокой точностью.

Принципы создания фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС).

Построение ФАГС – это один из этапов создания новой геоцентрической системы координат на основе спутниковых технологий.

Система геодезических координат определяется положением центра референц-эллипсоида и ориентировкой его осей в теле Земли и физически реализуется положением совокупности геодезических пунктов, закрепленных на поверхности Земли.

Государственная геодезическая сеть структурно должна формироваться по принципу перехода от общего к частному и включать:

фундаментальную астрономо-геодезическую сеть (ФАГС);

высокоточную геодезическую сеть (ВГС);

спутниковую геодезическую сеть 1-го класса.

Общие принципы использования ИСЗ в геодезических целях. Спутниковые навигационные системы.

Общеизвестно, что геодезические сети являются исходной основой всех топографо-геодезических изысканий, проектно-изыскательских, инженерных, строительных, разведочных и кадастровых работ, включая инвентаризацию земель. Плановая геодезическая сеть создает единое координатное пространство.

Практика показывает, что с течением времени требования к точности построения опорных геодезических сетей непрерывно возрастают.

При создании и последующем совершенствовании опорных геодезических сетей возникает большой круг научно-технических проблем и задач включающих, в том числе разработку: научно обоснованных и методических вопросов построения геодезических сетей с наивысшей точностью доступной при использовании новейших достижений геодезической науки и техники.

До второй половины 20 века основным источником информации для решения геодезических задач служили результаты наблюдений, выполненных на поверхности Земли, и на визирные цели расположенные на ней. Вследствие этого нельзя было связать между собой непрерывной сетью треугольников территории, разделенные большими водными пространствами и создать единую координатную систему для всей Земли.

Общие принципы использования ИСЗ в геодезических целях

Только после запуска в СССР 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли появилась реальная возможность построения пространственной триангуляции с большими сторонами.

Построение первой экспериментальной сети пунктов наблюдения ИСЗ в геодезических целях было начато Смитсоновской обсерваторией в 1959г. Она включала 12 пунктов, оснащенных аппаратурой для фотографирования ИСЗ на фоне звездного неба.

Использование наблюдений космических объектов в геодезических целях основано на векторном соотношении

$$\bar{r}_k = \bar{R}_i + \bar{\rho}_{ik}. \quad (6)$$

Если точка i соответствует пункту наблюдения ИСЗ, точка k – положению спутника, то радиус-вектор \bar{R}_i определяет положение пункта наблюдения, радиус вектор \bar{r}_k – положение спутника и вектор $\bar{\rho}_{ik}$ – положение спутника относительно пункта наблюдения (топоцентрическое положение спутника).

Исходя из того, какие величины определяющие три вектора известны, измерение вектора $\bar{\rho}_{ik}$ позволяет решить одну из двух задач. Прямая задача – определение вектора \bar{r}_k т.е. положения спутника, если известно положение пункта наблюдения т.е. вектор \bar{R}_i . Обратная задача определение вектора \bar{R}_i т.е. положения пункта наблюдения если вектор \bar{r}_k определен – положение спутника известно.

В спутниковой геодезии необходимо совместное решение многих прямых и обратных задач. Принципиально возможны два способа объединения этих задач

исходя из которых сформировалось два основных направления космической геодезии. Это динамический и геометрический методы.

Под динамическими задачами космической геодезии будем понимать такие задачи, при решении которых существенным образом используется теория движения ИСЗ. В данном методе спутник рассматривается, как носитель координат.

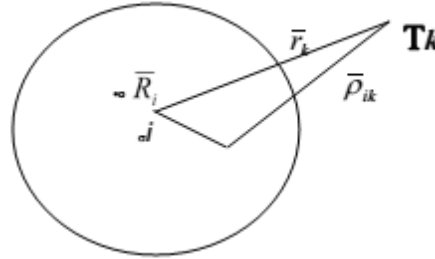


Рис.7 – Векторное соотношение в космической геодезии

Сравнивая наблюдаемые и предвычисленные по аналитической (или численной) теории положения ИСЗ в пространстве позволяют уточнить характеристики гравитационного поля и фигуры Земли а главные координаты пунктов

Динамическая спутниковая геодезия позволяет определить координаты станций наблюдений как абсолютные величины, отнесенные к центру масс Земли, в системе X,Y,Z , а также определять параметры гравитационного поля Земли. Кроме того, она позволяет получить точные элементы орбиты спутников.

Геометрические методы космической геодезии основаны на наблюдении спутников, используемых как высокие подвижные цели.

Метод построения спутниковой геодезической сети по синхронным наблюдениям положений ИСЗ с нескольких (минимум двух пунктов), когда мгновенные положения ИСЗ являются промежуточными неизвестными, называется геометрическим методом.

Связь между пунктами спутниковой геодезической сети в геометрическом методе осуществляется последовательным применением прямой и обратной задач в виде

$$\begin{aligned} \bar{R}_{i1} + \bar{\rho}_{i1k} &= \bar{r}_k; \\ \bar{r}_k - \bar{\rho}_{i2k} &= \bar{R}_{i2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Точность получения координат динамическим методом выше, чем геометрическим.

Для применения динамического метода необходимым является знание точного момента наблюдений. Для данного метода можно использовать синхронные и несинхронные наблюдения, что увеличивает число измерений.

Образно говоря, спутниковую геодезическую сеть можно рассматривать как двухэтажное построение. Первый этаж состоит из сравнительно небольшого количества пунктов и существует весь период построения сети. Второй же этаж дуги орбит и отдельные положения ИСЗ —строиться из отдельных частей, каждая из которых эфемерна: существует в пространстве ограниченный промежуток времени. Причем, если для дуги этот период определяется несколькими витками (сутками), то положение ИСЗ мгновенно. При этом особенностью построения

сети, как уже говорилось, является связь при помощи измерений только между этажами.

Динамический метод не ставит ограничений для расстояний между пунктами. Пункты сети построенные данным методом, могут, с одной стороны, располагаться локально, поодиночке, с другой стороны, отдельные пункты могут располагаться так близко друг к другу, как не могут располагаться пункты спутниковой триангуляции из-за геометрических ограничений для фигур сети.

Эффект Доплера.

Работа спутниковых навигационных систем основана на эффекте Доплера, который, как известно, заключается в том, что частота сигнала изменяется при движении спутника относительно наблюдателя. Это изменение (доплеровский сдвиг частоты) прямо пропорционально частоте передатчика и скорости движения передатчика относительно приемника. Относительную скорость часто называют лучевой (поскольку она направлена по лучу зрения наблюдателя), или радиальной, т.к. этот луч есть радиус -вектор движущегося объекта.

Имея график непрерывной записи лучевой скорости для некоторого интервала времени, мы можем получить и дальность до объекта, и ускорение объекта в некоторой точке орбиты.

Существует три варианта доплеровских систем. Это прежде всего без запросные системы, которые в основном и применяются в космической геодезии. На борту космического аппарата находится передатчик радиосигналов, вырабатываемых высокостабильным генератором частоты. На наземной станции – генератор опорных сигналов. Сравнение частот принимаемого и опорного сигналов позволяет выделить измеряемую частоту, которая равна разности частоты подставки и доплеровской частоты (частотой подставки называется разнице частот генераторов – наземного и спутникового). Специальное устройство преобразует измеряемую частоту в число периодов (циклов) доплеровского сигнала за определенный промежуток времени (от 0.5 до нескольких секунд).

В отличие от без запросных систем, в системах с запросом используется лишь один наземный генератор частоты, а на космическом объекте помещают приемоответчик, ретранслирующий принятые со станции сигналы обратно на Землю. Наземная станция сравнивает частоты запросного и ответного сигналов и измеряет сдвиг частоты.

Аппаратурой, измеряющей непосредственно частоту принимаемых с ИСЗ сигналов, оборудуются обычно стационарные доплеровские станции, принимающие участие в долгосрочных программах (например, при исследовании движения полюсов Земли).

На таких станциях необходимо иметь высокоточные стандарты времени, работу которых надо точно синхронизировать. Кроме того, возникает проблема обработки большого числа измерений, т.к. одно прохождение спутника над горизонтом станции дает несколько сот измерений доплеровской частоты. Поэтому в настоящее время гораздо более широкое распространение получили так называемые интегральные доплеровские приемники.

Идея интегрального доплеровского метода заключается в том, что разность двух последовательных отсчетов для числа циклов доплеровского сигнала есть

определенное выражение (так называемая линейная комбинация) разности топосцентрических расстояний до двух последовательных положений ИСЗ на орбите и частоты подставки.

Частота подставки обычно включается в число определяемых параметров, считая, что за время одного прохождения ИСЗ над станцией она постоянна, но может меняться от прохождения к прохождению.

В настоящее время созданы точные навигационные системы ГЛОНАСС (Россия) и GPS – США (24 спутника), Галлилео (Европа). Каждая из них состоит не менее чем из 18 спутников Земли и позволяет в любой момент времени и практически в любой части земного шара определять геоцентрические координаты с очень высокой точностью.

Технология GPS (Глобал позиционинг систем) выполнения полевых топографо-геодезических работ неразрывно связана с внедрением в геодезическое производство спутниковых систем позиционирования (таких как GPS и ГЛОНАСС), открывающих перспективу резкого повышения производительности труда при одновременном повышении точности измерений. Применение GPS – технологии не требует взаимной видимости пунктов, измерения могут вестись в любое время суток, в любую погоду.

GPS – технология позволяет выполнять все виды топографо-геодезических работ от высокоточных научно-исследовательских и развития геодезических сетей, до создания съемочного обоснования и топографической съемки местности с использованием электронных тахеометров.

Геодезические измерения с помощью GPS стали популярными благодаря таким преимуществам как точность, быстроедействие, гибкость и экономическая эффективность. Используемые методы работы, однако, совершенно отличаются от классических геодезических наблюдений.

Спутниковая глобальная система определения местоположения пунктов GPS, известная также под названием NAVSTAR, рассчитана на высокоточное определение пространственных координат и вектора скорости движения определяемого объекта в любой момент времени и в любой точке земного шара (включая околоземное космическое пространство).

Структурная схема системы GPS состоит из совокупности ИСЗ и наземных командно-измерительных средств, позволяющих определить параметры орбит, контролировать работу бортовой аппаратуры и управлять ею.

В системе используются искусственные спутники Земли (ИСЗ) на высоких круговых орбитах с периодом обращения 12 часов (высота орбиты над земной поверхностью составляет 20 165 км). Полный комплект космической системы насчитывает 24 ИСЗ, расположенных на трех орбитах с наклоном 63° восходящие узлы которых смещены относительно друг друга на 120° . Система работает на основе доплеровского без запросного метода.

В настоящее время спутниковая геодезическая аппаратура представляет собой двухчастотный портативный приемник - сенсор с вмонтированной системой и переносной компьютер - контроллер на базе 386-го микропроцессора предназначенные для задания режима работы записи получаемых сигналов и необходимой для работы информации. Он позволяет выполнять предварительную об-

работку результатов измерений и обеспечивает запись информации на электронную карту, которая стыкуется с внешним обрабатывающим устройством.

Математическое обеспечение – полностью автоматизированный комплекс программ, оснащенный графическим аппаратом высшего уровня. В указанную цепочку включается и электронный тахеометр для решения съемочных задач.

Для того, чтобы более наглядно представить использование GPS рассмотрим это на примере работ, связанных с созданием и обновлением маркшейдерской опорной сети в горнодобывающих районах.

В связи с извлечением полезных ископаемых их недр Земли, происходит деформация земной поверхности, особенно на угольных и нефтедобывающих месторождениях. Поэтому возникает необходимость выполнять периодически контрольные определения координат опорной маркшейдерской сети. Анализ результатов контрольного определения координат и высот геодезических пунктов, с прежними значениями говорит о значительных их изменениях в положении на подрабатываемых территориях.

Порядок проведения полевых работ.

Перед началом работ рассматриваются критерии целесообразности применения спутниковой аппаратуры:

1. условия видимости;
2. сроки выполнения работ;
3. длины сторон в создаваемой сети (не менее 100 м);
4. удаленность определяемых пунктов от исходных.

Тщательно изучив все условия, проведя рекогносцировку и определив наличие и состояние исходных пунктов, которых должно быть не менее 4, используя программное обеспечение, по текущему спутниковому альманаху устраивают график полевых работ как на исходных пунктах, так и на определяемых. Тем самым, еще перед началом полевых работ устраивают возможные ошибки, связанные с радиовидимостью.

Исходные пункты выбираются из пунктов ГГС так, чтобы определяемые пункты входили в создаваемую локальную сеть. В зависимости от условий радионаблюдений и требуемой точности, выбирают режимы наблюдений, например:

- статика – наиболее точный способ наблюдений. Применяется на длинах линий более 10 км, при этом конечно увеличивается и продолжительность наблюдений, от 30-40 минут и выше. Чаще всего используется при высокоточных работах, необходимых, например, при привязке к пунктам ГГС;

- быстрая статика – наиболее распространенный режим, позволяющий определять длины линий до 10 км, с точностью 1.5-2 см и временем наблюдений на пунктах от 5 до 20 минут;

- стоп-гоу – на коротких линиях и при хорошей видимости можно определять координаты пунктов с точностью 10-15 см и временем наблюдений 8-10 сек.

Все измерения проводятся «лучевым методом», который подразумевает наличие одной постоянной базовой станции и, как минимум, одной подвижной. Координаты любого пункта в этом случае будут вычисляться по отношению к неподвижной базовой станции.

Для работы в навигационном режиме (точность 1 м) достаточно одной станции но для решения более серьезных задач необходимо как минимум две станции при этом достигнутая точность определения координат точек на местности до 5 мм+ 1мм на каждый километр удаления работающих приемников друг от друга (базовая и ровер).

Базовая линия – это измеренная и вычисленная линия между двумя приемниками.

Период наблюдений и точность в основном зависят от длины базовой линии. В зависимости от площади района и числа определяемых точек устанавливается одна или более временных референц-станций. Базовые линии должны радиально расходиться от временной референц-станции. Более выгодно измерять короткие базовые линии (5 км) от нескольких референц-станций, чем длинные (15 км) от одной центральной точки.

Требования к референц-станции:

Отсутствие препятствий блокирующих небосклон выше 15°.

Отсутствие отражающих поверхностей.

Вдалеке от транспорта и прохожих.

Отсутствие радио, телевизионных и т.п. передатчиков.

Приемник должен функционировать надежно.

Для вычисления параметров трансформирования на пунктах с местными координатами устанавливать роверы.

GDOP - геометрия расположения спутников на небосклоне. Низкое GDOP - жесткая геометрия.

Высокое значение GDOP сообщает нам, что засечка слаба. Слабую спутниковую засечку можно сравнить с «мертвой» зоной в классической обратной засечкой. Если засечка слаба, то результат полученный после обработки будет не надежен.

Для успешных высокоточных измерений желательно выполнять наблюдения в «благоприятные» окна. Модуль программы поможет выбрать наиболее благоприятные периоды наблюдений, если знать широту и долготу своего местоположения с точностью приблизительно 1°.

Диапазон длин измеряемых базовых линий для ночных наблюдений может быть приблизительно удвоен по сравнению с дневными. Или период наблюдений ночью может быть вдвое уменьшен по сравнению с дневными.

Нельзя планировать минутные GPS -наблюдения особенно при высокоточных работах.

GDOP менее или равен 8. GDOP =5 или ниже идеален.

В подходящем окне 4 или более спутников. Угол их возвышения 15 для ровера и референц-станции.

Время наблюдений зависит от длины базовой линии, числа спутников, спутниковой геометрии, состояния ионосферы. Степень возмущения ионосферы изменяется со временем суток и местоположением на поверхности земли. Поскольку возмущения ионосферы намного ниже ночью, то время ночного наблюдения быстрой статикой можно сократить вдвое или же за тот же срок измерения определить базовую линию в два раза длиннее. В настоящее время наблюдается

подъем ионосферной активности в рамках 11-ти летнего цикла солнечной активности. Поскольку ожидается возрастание ионосферной активности, то в ближайшем будущем следует постепенно увеличивать периоды наблюдений. Ионосферная активность зависит также от местоположения на поверхности земли. Обычно ее влияние меньше в средних широтах.

Таблица 4 - Приблизительное время наблюдений для двухчастотных приемников

Метод наблюдения	Число спутников	Длина базовой линии, км	Приблизительное время наблюдений	
			Днем	ночью
Быстрая статика	4 и >	До 5	5-10 мин.	5 мин.
	4>	5-10	10-20	5-10мин.
	5>	10-15	более 20	5-20 мин.
Статика	4>	15-30	1-2 часа	1 час
	4>	> 30	2-3 часа	2 часа

Трансформация в местную систему координат. Получаем точные относительные координаты точек, которые связываются впоследствии в единую сеть в течение постобработки. Определяются координаты на WGS 84 эллипсоиде. В большинстве случаев будет необходимо трансформировать WGS 84 координаты полученные в результате GPS измерений в местные зональные координаты, т.е. в координаты на плоскости в местной проекции с референц-эллипсоида.

Для того, чтобы вычислить параметры трансформации и число определяемых точек (GPS сеть) должны быть включены пункты с известными местными координатами. Эти общие пункты с WGS 84 и местными координатами используются для того, чтобы определить параметры трансформации и обнаружения ошибок исходных данных.

Общие пункты должны быть равномерно распределены по всему району работ. Для правильного вычисления всех параметров трансформации (смещения по всем осям координат, разворот осей, масштаб) должны использоваться по крайней мере три, но предпочтительнее 4 или более пункта.

Планирование наблюдений.

Тщательно запланируйте сеансы наблюдений.

Продумайте общую схему измерений, число точек, необходимую точность.

Запланируйте привязку к существующей геодезической сети.

Определите наилучшие способы наблюдений и вычислений.

Уделите внимание трансформации в систему местных координат.

Старайтесь сократить длины базовых линий, насколько это возможно.

Используйте благоприятные окна.

Контрольные измерения

Во всех типах геодезических работ сложившейся практикой должно стать осуществление многократного контроля по независимым измерениям. Этому необходимо уделять внимание и при GPS измерениях.

Особенно тщательно нужно относиться к измерениям быстрой статикой с коротким периодом наблюдений на точках. Для полностью независимого контроля:

- выполните измерения на точке дважды в разное время суток. Это гарантирует различие: в установке антенны приемника (центрировании), расположении спутников на небосводе и атмосферных условиях;
- замкните ход базовой линией от последней точки до исходной точки;
- измерьте независимые базовые линии между пунктами сети.

Частичный контроль может быть достигнут при использовании двух референц-станций вместо одной. В распоряжении будет два вектора от жестких точек, но в конце каждого будут те же самые результаты центрирования антенны и наблюдения, выполненные тем же самым приемником.

Спутниковая система работает в системе геоцентрических координат, величины горизонтальных углов (дирекционных) можно получить только после окончательной обработки полевой измерительной информации из решения обратных геодезических задач. После создания сети спутниковой аппаратурой ее пункты можно использовать для решения ряда горнотехнических задач, причем дальнейшая работа на этих пунктах будет проводиться традиционными методами.

При производстве спутниковых координатных определений необходимо знать, с какой фактической точностью погрешностью проведено то или иное измерение. Для спутниковой аппаратуры это едва ли не самый важный вопрос. Оценивать результаты необходимо не только по совокупности ряда критериев – времени наблюдения, значения GDOP, качеству приема радиосигналов, по разрешению или неразрешению неоднозначности. Оценкой качества измерений служит также погрешность переопределения координат исходных пунктов ГГС, которые будут участвовать в трансформировании, при переводе из системы WGS- 84 в локальную.

Основные процессы и организация работ при создании плановых опорных геодезических сетей.

Основные процессы и организация работ при создании плановых опорных геодезических сетей

Построение основных геодезических сетей включает в себя следующие этапы: проектирование, рекогносцировка, закладка центров, постройка наружных знаков, высокоточные угловые, линейные, высотные измерения в сети, математическая обработка выполненных измерений в сети.

Структурная схема основных этапов создания ГГС показана на рис. 8.



Рис.8 - Структурная схема основных этапов создания ГГС

Производству полевых работ на данном участке предшествует составление технического проекта геодезической сети. Организационные и технические принципы проектируемых работ, определяющие их содержание, объем, методику, размещение и сроки, а также сметную стоимость указываются в документах – в технических проектах.

Главной задачей проектирования является изыскание наиболее выгодного в техническом отношении варианта построения геодезической сети на данном участке.

Качество геодезической сети и стоимость ее построения находятся в прямой зависимости от качества технического проекта.

Проектирование опорных геодезических сетей

Качество геодезической сети и стоимость ее построения находятся в прямой зависимости от качества технического проекта. Таким образом, проектирование является ответственной задачей, при решении которой необходимо правильно решить все организационные, технические и экономические вопросы, связанные с построением данной сети.

Проектирование сети включает:

1) анализ состояния геодезической изученности района работ с учетом возможно более полного использования ранее развитых сетей;

2) составление схемы сети на карте с учетом наилучшего расположения пунктов и густоты сети, а также с учетом удобства использования пунктов для последующих топографо-геодезических работ;

3) установление методики работ, технических допусков в соответствии с действующими инструкциями и предрасчет ожидаемой точности элементов проектируемой сети;

4) установление общего объема работ и необходимых для их выполнения кадров, транспортных средств, приборов и материалов;

5) разработку мероприятий по организации работ и плана их выполнения.

Технический проект геодезической сети необходимо проверить и уточнить путем полевой рекогносцировки. Рекогносцировку сети надо начинать с исходных пунктов. В результате рекогносцировки должно быть выбрано расположение пунктов сети таким образом, чтобы обеспечить наилучшую форму треугольников и нормальную высоту визирного луча по всем запроектированным направлениям при минимальных высотах знаков и при минимальных затратах средств на проведение работ.

Геодезические знаки и центры. Геодезические опорные сети, пункты которых закрепляются на местности центрами и реперами, выполняют свое назначение, пока эти сооружения сохраняются в неизменном положении.

Все пункты геодезических сетей закрепляются на местности специальными геодезическими знаками. Они состоят из двух основных частей: подземной – центра пункта, и устанавливаемого над ним наружного сооружения – геодезического знака, несущего визирный цилиндр, имеющего столик для наблюдателя.

В зависимости от конструкции, высоты и подставки для прибора геодезические знаки бывают следующих типов: тур, пирамида (простая и со штативом), простой сигнал и сложный сигнал.

Центры геодезических пунктов. Положение каждого пункта геодезической сети закрепляют на местности при помощи специального подземного центра, который является носителем координат и высот пунктов.

Пункты опорных сетей закрепляют в местах, удобных для их использования и обеспечивающих их длительную сохранность.

На пунктах триангуляции, полигонометрии, трилатерации 4 –го класса строят простые пирамиды и простые сигналы. На пунктах аналитической сети 1-го разряда строят простые пирамиды, 2-го разряда разрешается использовать вежи, устанавливаемые по отвесу.

Типы центров выбирают в зависимости от характера грунта, глубины его промерзания и глубины залегания горизонта грунтовых вод.

Каждый пункт геодезической сети на местности закрепляют центром. Над центром сооружается знак, который имеет визирный цилиндр, столик для установки прибора и площадку для наблюдателя. Если по условиям местности допустима установка прибора на штативе, то знак служит только для установки визирной цели.

При создании сетей 3 и 4 классов чаще всего применяются следующие типы знаков: тур, простая пирамида, простой сигнал. Туры и пирамиды строят на пунктах, с которых видимость на соседние пункты открывается с земли.

Геодезические знаки могут быть деревянными или металлическими, четырехгранными и трехгранными, постоянными или разборными. Выбор типа знака определяется физико-географическими условиями района работ, технико-экономическими показателями или специальными назначениями создаваемой сети. Геодезические знаки должны быть прочными, жесткими и устойчивыми.

Пункты опорных сетей закрепляются в земле бетонными центрами, железобетонными или асбестовыми трубами и наружными знаками.

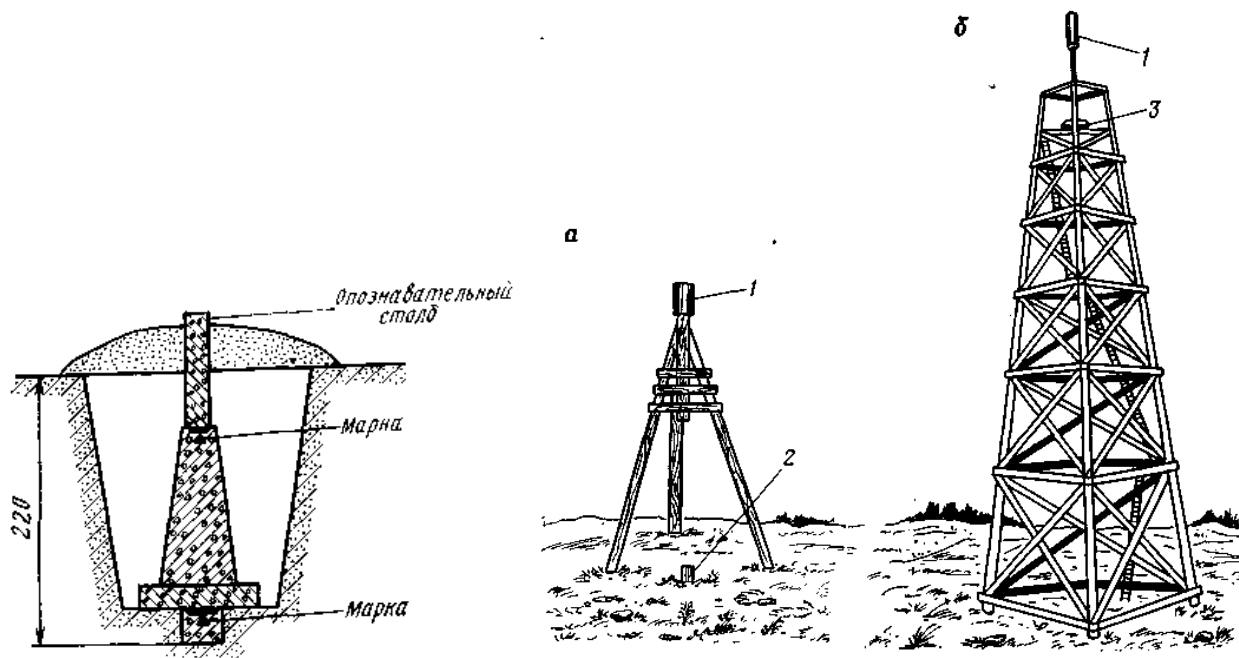


Рис. 9 – Геодезические центры и знаки

Оценка точности геодезических сетей имеет большое теоретическое и практическое значение. Расчеты по определению точности различных элементов геодезической сети проводят как до ее построения – при проектировании, так и по завершении работ – в процессе уравнивания.

Оценка точности, выполняемая на заключительном этапе уравнивательных вычислений, дает наиболее достоверные данные о реальной точности элементов построенной на местности геодезической сети.

Оценка точности запроектированной сети необходима для технической грамотной и экономически рациональной постановки работ, ибо от заданной точности зависит выбор методов измерений, схем построения сети, подбор приборов и кадров, объем затрат труда, времени и средств. Чем точнее сеть, тем больший срок требуется для ее построения, тем она дороже.

Простейшие проекты сетей триангуляции и полигонометрии можно оценить с помощью таких известных выражений как формулы ошибки слабой стороны или ошибки дирекционного угла, ошибки конечной точки хода (полигонометрия). Более сложные геодезические построения следует оценивать строгими методами, используя ЭВМ.

Априорную оценку точности построения геодезических сетей выполняют на ЭВМ по методу наибольших квадратов.

При оценке проекта сети средние квадратические ошибки любых элементов сети вычисляют в общем случае по формуле

Величина средней квадратической ошибки единицы веса μ на стадии проектирования задается заранее (из опыта подобных измерений или по инструкции). Обратный вес оцениваемого элемента в допусках вычисляют по приближенным формулам.

Геодезист должен уметь заранее рассчитать прочность геодезической сети, возможные деформации ее, знать закономерности накопления ошибок с тем, чтобы правильно проектировать ее построения, правильно устанавливать методы измерений, количество приемов измерений, частоту базисов и пунктов Лапласа.

Предварительная оценка проекта сети оправдана во всех случаях, когда в силу местных условий приходится отступать от нормативных требований к длинам сторон и величинам углов в триангуляции, при применении более совершенных средств измерений, желании получить более широкую и разностороннюю информацию о качестве составленного проекта. Современные средства обработки геодезических измерений без больших затрат позволяют получить многообразную информацию о точности сети.

Средняя квадратическая ошибка любого уравненного элемента в общем случае равна

$$m = m_{исх.}^2 + m_F^2, \quad (8)$$

где $m_{исх.}$ – средняя квадратическая ошибка влияния исходных данных;
 m_F – средняя квадратическая ошибка оцениваемой функции уравненных величин.

$$m_F = \mu \sqrt{\frac{1}{P_F}}, \quad (9)$$

где μ – средняя квадратическая ошибка единицы веса, находимая из уравнения или задаваемая инструкцией, или известная заранее по аналогичным геодезическим построениям.

На стадии проектирования средние квадратические ошибки измеряемых величин задают с учетом имеющегося опыта измерений таких величин. В этом случае вес запланированных к измерению в проектируемой сети горизонтальных направлений N , азимутов α , расстояний S вычисляют по формулам

$$PN = c/m^2N; P\alpha = c/m^2\alpha; PS = c/m^2S;$$

Горизонтальные направления на пунктах геодезической сети каждого данного класса измеряют равноточно. $P = 1$, отсюда $c = m^2N$;

Тогда формулы примут вид

$$P_N = 1; P_\alpha = m_N^2 / m_\alpha^2; P_s = m_N^2 / m_s^2; m_N = m / \sqrt{2}. \quad (10)$$

где m – средняя квадратическая ошибка измеренного угла.

Получено множество разных по форме и точности приближенных формул априорной оценки точности различных элементов геодезических сетей, создаваемых разными методами.

На стадии проектирования μ задается заранее. Она достаточно хорошо известна из практики геодезических измерений и регламентируется инструкциями для сети каждого класса.

Формула (9) применяется как на стадии предрасчета точности построения сети, так и при уравнивании.

В триангуляционных построениях (рядах) относительную ошибку слабой стороны находят по формуле

$$\left(\frac{m_s}{s}\right)^2 = \left(\frac{m_b}{b}\right)^2 + k \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \sum_1^n (ctg^2 A_i + ctg^2 B_i + ctg A_i ctg B_i) \quad (11)$$

или в логарифмическом виде

$$m_{lg s}^2 = m_{lg b}^2 + k \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \sum R_i, \quad (12)$$

$$R_i = \sum (\delta_{A_i}^2 + \delta_{B_i}^2 + \delta_{A_i} \delta_{B_i}), \quad (13)$$

где $m_{lg s}$ и $m_{lg b}$ - средние квадратические ошибки логарифмов слабой и базисной сторон в единицах шестого знака логарифма; m_β - средняя квадратическая ошибка измеренного угла; $k=2/3$ для сети, состоящей из треугольников, и $k=1/2$ для сети, состоящей из геодезических четырехугольников или центральных систем; δ - изменения логарифмов синусов связующих углов при изменении этих углов на одну секунду, выраженные в единицах шестого знака логарифма.

Переход к относительной ошибке делается по формуле

$$\frac{m_s}{s} = \frac{m_{lg s}}{0,43 \cdot 10^6}. \quad (14)$$

Средняя квадратическая ошибка азимута связующей стороны равна

$$m_\alpha = \sqrt{\frac{m_A^2}{2} + \frac{m_\beta^2}{25} \left[(5k+12) - \frac{(5k+6)^2}{5N+22} \right]}, \quad (15)$$

где m_A - средняя квадратическая ошибка измерения азимутов Лапласа; N - число треугольников в звене.

Для приближенного подсчета ошибок в положении пункта можно воспользоваться формулами продольного m_L и поперечного m_q сдвигов:

$$m_L^2 = \frac{L^2}{2} \left(\frac{m_b^2}{b^2} + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot \frac{2n^2 - 3n + 10}{9n} \right); \quad (16)$$

$$m_q^2 = \frac{L^2}{2\rho^2} \left(m_\alpha^2 + \frac{n^2 + 2n + 12}{15} m_\beta^2 \right),$$

где L - длина диагонали ряда; $\frac{m_b}{b}$ - относительная ошибка исходной стороны; n - число сторон (промежуточных) в сети, из которых складывается длина L .

Средняя квадратическая ошибка M определения положения конечного пункта ряда треугольников относительно его начального пункта вычисляется по формуле:

$$M = \sqrt{m_L^2 + m_q^2}. \quad (17)$$

Для уравнивания звена полигонометрии 1 класса можно использовать формулы В.В. Данилова для продольного и поперечного сдвигов

$$\begin{aligned} m_L &= \sqrt{nm_s^2 + n^2 m_\sigma^2}; \\ m_q &= \frac{L}{\rho} \sqrt{\frac{m_A^2}{2} + \frac{n+3}{12} m_\beta^2}, \end{aligned} \quad (18)$$

где n - число сторон в звене полигонометрии; m_s и m_σ - случайная и систематическая ошибки измерения расстояний; m_A и m_β - средние квадратические ошибки измерения азимутов и горизонтальных углов соответственно.

В разрядной сети триангуляции сети среднюю квадратическую ошибку в слабом месте (связующей стороны) цепочки, опирающейся на две исходные стороны (на четыре пункта, определяют приближенной формулой

$$m_S^2 = \frac{\mu^2}{P_S} = \frac{m_{S_1}^2 \cdot m_{S_2}^2}{m_{S_1}^2 + m_{S_2}^2}, \quad (19)$$

где

$$m_{S_i} = \frac{m_{\lg S_i}}{M \cdot 10^6} S_i; \quad (20)$$

S_i - длина оцениваемой стороны, вычисленная от базиса с номером i ,

M - модуль десятичных логарифмов.

$$\begin{aligned} m_{\lg S_1}^2 &= 2/3 m_\beta^2 \sum_1^n R + m_{\lg b_1}; \\ m_{\lg S_2}^2 &= 2/3 m_\beta^2 \sum_1^n R + m_{\lg b_2}; \end{aligned} \quad (21)$$

где $R = \delta_A^2 + \delta_B^2 + \delta_A \delta_B$; δ_A, δ_B - переменные логарифмов связующих углов А и В при изменении их на 1"; m

m_β - средняя квадратическая ошибка измерения угла.

$$m_S = \frac{S \cdot m_{\lg S_1} \cdot m_{\lg S_2}}{M \cdot 10^6 \sqrt{m_{\lg S_1}^2 + m_{\lg S_2}^2}} \quad (22)$$

Высокоточные угловые измерения. Высокоточные угломерные приборы. Способы высокоточных угловых измерений.

Наиболее массовым видом геодезических измерений при создании опорных геодезических сетей являются угловые измерения. Точность этих измерений зависит от требуемой точности построения геодезической сети.

При создании государственной геодезической сети методами триангуляции и полигонометрии на всех пунктах измеряют горизонтальные углы и зенитные расстояния, на пунктах Лапласа выполняют астрономические определения широт, долгот и азимутов, для чего измеряют зенитные расстояния между звездными и земными предметами, азимуты которых определяются. В сетях трилатерации угловые измерения выполняют для привязки ориентирных направлений.

По назначению геодезические угломерные приборы подразделяются на теодолиты и астрономические теодолиты.

Теодолиты можно классифицировать по ряду различных признаков.

По области применения можно выделить следующие группы теодолитов: геодезические (применяемые для измерения углов в геодезической практике), астрономические (для определения астрономических широт, долгот и азимутов), маркшейдерские (для измерений в подземных горных выработках), гироскопические (для определения азимута гироскопическим методом).

По точности измерений теодолиты классифицируют на высокоточные – с погрешностями менее 1.5", точные – с погрешностями 1.5"-10", технические – с погрешностями более 10".

По физической природе носителей информации различают теодолиты оптические и электронные. У оптических теодолитов лимб изготовлен из оптического стекла, отсчеты по лимбу берут при помощи оптической отсчетной системы со шкаловым микрометром или оптическим микрометром. У электронных теодолитов рабочая мера может задаваться электротехническими элементами (индуктивностью, емкостью, резисторами и т.п.) либо датчиками типа «угол - код – цифра». Считывание информации выполняется визуально с цифрового табло или в автоматическом режиме – с регистрацией на носитель информации.

В начале 30-х годов в связи с огромными объемами работ по созданию АГС в СССР перед геодезическим приборостроением встала задача по разработке и выпуску высокоточных теодолитов. В 1934 году завод «Аэрогеоприбор» начал выпускать универсальный теодолит У-5, предназначенный для угловых измерений в огромной АГС бывшего СССР. Он обеспечил измерение горизонтальных углов и астроопределений в триангуляции 2 класса.

В 1935 г. был разработан высокоточный триангуляционный теодолит ТТ-2/6, предназначенный для измерений углов в триангуляции 1 класса. Его выпуск продолжался до 1965 года. С помощью теодолитов ТТ-2/6 выполнен основной объем угловых измерений в огромной сети бывшего СССР. Он обеспечил измерение горизонтальных углов при расстоянии 20-30 км с точностью 0.5"-0.7".

В 1940 году завод «Аэрогеоприбор» выпустил первую партию высокоточных оптических теодолитов ОТ-02, модернизированных в 1965 г. и получивших

шифр ОТ-02М. Теодолиты были предназначены для угловых измерений в сетях триангуляции 1-4 классов.

В 1968 г. вместо теодолита ТТ-2/6 начался выпуск разработанного в ЦНИИГАиК нового высокоточного оптического теодолита Т-05 полусекундной точности. Теодолит был предназначен для измерения горизонтальных и вертикальных углов на пунктах триангуляции и полигонометрии 1 класса.

В конце 70-х годов был начат выпуск новых оптических теодолитов Т1 секундной точности.

Среди высокоточных зарубежных теодолитов того времени можно выделить Theo 002 “Карл Цейс, Йена” – высокоточный оптический универсальный астрономо-геодезический прибор, предназначенный для астрономических определений и для выполнения высокоточных угловых измерений на геодезических пунктах. Средняя квадратическая погрешность измерения горизонтального угла одним приемом 0.5"-0.7".

С помощью указанных теодолитов были выполнены угловые измерения на пунктах государственной геодезической сети бывшего СССР, в том числе и Казахстана.

При создании опорных высокоточных сетей угловые измерения выполняют в условиях, характеризующихся разнообразием физико-географических и климатических условий района работ. Для обеспечения максимальной точности результатов измерений и при условии многолетней эксплуатации прибора к нему предъявляются особые требования, а именно:

- сохранение работоспособности и устойчивой точности результатов угловых измерений в различных физико-географических условиях и в течении срока его эксплуатации;

- приборы должны быть удобными для широкого их использования в практике геодезических работ, что достигается уменьшением веса, размеров и уменьшению стоимости прибора.

Высокоточный оптический теодолит состоит из следующих основных частей (рис. 10):

осевой системы, в которую входит вертикальная ось теодолита 1, ось вращения трубы 2, точный уровень (накладной или алидаде) 3; подставка 9;

рабочей меры – лимбов горизонтального 4 и вертикального 5 кругов;

визирного устройства – зрительной трубы с окулярным микрометром 7;

отсчетного устройства 8, включая оптический микрометр.

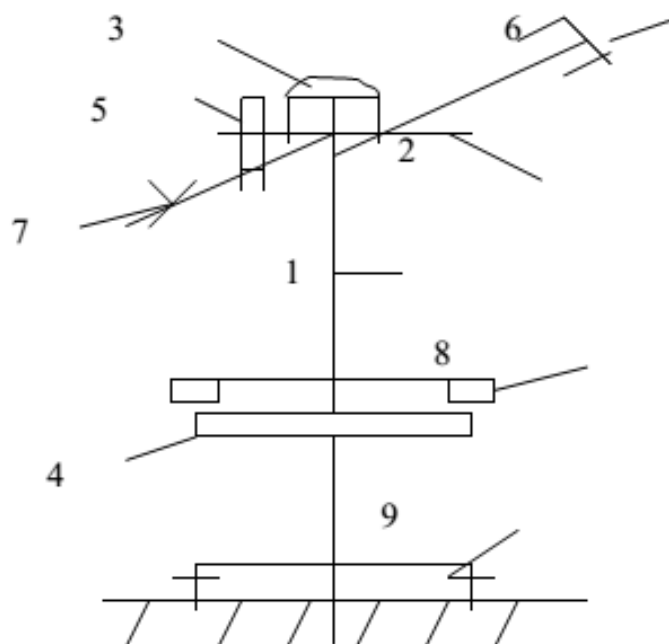


Рис. 10 – Схема высокоточного оптического теодолита

Основные части теодолита находятся между собой в определенной связи; точность их изготовления должна быть согласована.

Любые нарушения геометрической схемы теодолита в процессе угловых измерений неизбежно ведут к появлению ошибок, отрицательно влияющих на результаты измерений.

В задачу поверок и юстировок входят выявление отклонений от геометрических параметров и оптико-механических требований, положенных в основу конструкции теодолита, и наиболее полное их устранение. Исследования предусматривают определение неустранимых отклонений с целью введения соответствующих поправок в результаты измерений.

К числу обязательных поверок относятся следующие:

ось цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга должна быть перпендикулярна к оси вращения теодолита;

визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна оси ее вращения. Невыполнение данного условия приводит к возникновению коллимационной погрешности, которая не должна превышать величины $2c = \text{КЛ} - \text{КП} \pm 180^\circ \leq 20''$. Влияние коллимации на измеренное направление полностью исключается в среднем из двух отсчетов, полученных при двух положениях трубы – КЛ и КП.

Ось вращения зрительной трубы должна быть перпендикулярна к оси теодолита. Для исключения ошибок, возникающих из-за неперпендикулярности горизонтальной оси трубы к вертикальной оси теодолита и неравенства диаметров цапф необходимо направления измерять при двух положениях трубы и брать среднее арифметическое из полученных отсчетов.

Определение места зенита MZ или места нуля MO вертикального круга. $MZ = КЛ + КП - 180^\circ$ или $МО = КП - КЛ + 90^\circ$ (теодолит ОТ-02М) должно быть не более $10''$.

При исследованиях высокоточных теодолитов определяются ошибки диаметров лимба, мертвый ход оптического микрометра, рен оптического микрометра, эксцентриситет алидады и лимба.

К ошибкам, связанным с непосредственным изготовлением частей и деталей инструмента относятся ошибки диаметров лимба. Это наиболее крупные инструментальные ошибки. Влияние данных ошибок уменьшают методикой проведения угловых измерений. Каждый угол измеряют несколькими приемами. В каждом приеме начальные установки алидады должны быть равномерно распределены в пределах полуокружности лимба. Горизонтальный круг необходимо переставлять между приемами на угол

$$\delta = 180^\circ / m + i, \quad (23)$$

где m - число приемов, i - цена деления лимба теодолита.

Мертвый ход оптического микрометра обусловлен тем, что когда шкала микрометра вращается, передаточный механизм приводит плоскопараллельные пластинки в движение с некоторым опозданием, следовательно с опозданием начинают перемещаться шкалы лимба. Барабан в первые мгновения вращается вхолостую. Мертвый ход особенно заметен в момент изменения вращения барабана на обратное. Для уменьшения влияния данной ошибки на отсчеты по лимбу, необходимо последнее движение головки микрометра при совмещении штрихов лимба всегда заканчивать, вращая головку микрометра по ходу часовой стрелки.

Разность между номинальной и измеренной с помощью микрометра величины полуделения лимба называется реном r . Цена наименьшего деления отсчетного барабана микрометра

$$\mu = i / n, \quad (24)$$

где i - наименьший интервал между штрихами лимба в дуговой мере, цена деления лимба;

n - число делений барабана микрометра, соответствующее одному делению лимба.

На самом деле μ нам не известно, т.к. не известно фактическое число делений барабана микрометра, укладываемых в одном делении лимба. Известно их теоретическое число, предусмотренное при конструкции прибора n_0 .

$$r = n_0 - n. \quad (25)$$

Под эксцентриситетом алидады понимают несовпадение центра вращения алидады с центром кольца делений лимба. Эксцентриситетом лимба называется несовпадение проекции центра вращения горизонтального круга и центра кольца делений лимба. Эксцентриситеты характеризуются линейными и угловыми элементами. Эксцентриситет алидады влечет за собой сдвиг отсчетного индекса.

Электронные теодолиты. Роботизированные тахеометры.

Развитие микропроцессорной техники привело к значительному усовершенствованию геодезических приборов, в том числе и высокоточных теодолитов.

Микропроцессоры служат для обработки и передачи данных, а также для управления процессом измерения и расчета поправок, компенсирующих погрешности измерительных инструментов. Использование микропроцессоров обеспечивает большую экономичность нового поколения приборов за счет уменьшения числа обслуживающих лиц и сокращения времени на измерения при одновременном повышении точности результатов измерений.

В последнее время на мировом рынке появился широкий выбор высокоточных электронных теодолитов и комбинированных приборов в виде электронных тахеометров.

Вместо традиционной отсчетной системы со стеклянным лимбом и оптическим микрометром в электронных теодолитах используются электронные системы измерения углов.

Например в кодовых теодолитах лимб представляет собой диск с концентрическими прозрачными или непрозрачными делениями. Против каждого деления расположен люминисцентный диод, световой луч которого, проходя отверстие в лимбе, преобразуется фотодиодом в электрический сигнал. В электронной системе измерения угла методом приращений используются лимбы с радиальными делениями, которые представляют собой набор черно-белых полей, через которые с помощью люминисцентного диода и фотодиода аналогично кодовому методу световой сигнал преобразуется в электронный.

К одним из первых высокоточных электронных теодолитов относится теодолит T 2000S фирмы «Вильд Хербругг» (Швейцария).

Модификацией данного теодолита является теодолит Wild TM 3000 фирмы «Вильд Хербругг» (Швейцария).



Рис.11 - Теодолит Wild TM 3000

Технические характеристики прибора: фокусировка автоматическая; изображение – прямое; точность наведения – $0.9''$; точность измерения горизонтальных и вертикальных углов - $0.5''$; диапазон рабочих температур от -20° до $+50^{\circ}$ C; масса – 12.7 кг.

Теодолиты серии Wild 3000 – оснащены высококачественной зрительной трубой и двухосным компенсатором. Они предназначены для выполнения высокоточных измерений в геодезии и промышленности. В комплекте с дальномерной насадкой теодолит превращается в высокоточный тахеометр.

На основе моторизованных теодолитов типа ТМ 3000 создана автоматическая теодолитная система измерений Wild ATMS (Leica), предназначенная для высокоточных наблюдений за деформациями инженерных сооружений и полностью автоматизированная. Система сканирует все необходимые точки на объекте в соответствии с программируемыми инструкциями и может давать информацию о размерах, формах, деформациях, кривизне, пересечениях, плоскостях, прямых углах, трехмерных моделях и т. п. Система позволяет определить отклонение менее 1 мм.

Роботизированные тахеометры обладают сервоприводами, радиокommunikационными устройствами. Системы автоматического поиска и слежения за отражателями позволяют повысить производительность труда в 2 раза по сравнению с механическими тахеометрами. Приборы могут обслуживаться только одним исполнителем: например управляться реечником по радиомадему или только наблюдателем – при работе без отражателя. Точность и функции роботов-автоматов позволяют использовать эти приборы при высокоточных работах, автоматическом наблюдении за деформациями инженерных сооружений и земной поверхности, автоматическом управлении машинами на стройке, а также при стандартных геодезических работах: крупномасштабных съемках, обмерах сооружений, разбивке.

Leica выпускает роботизированные модели профессиональной серии 1100. Наличие 360-градусных призм на отражателях позволяют повысить производительность труда за счет того, что нет необходимости ориентировать отражатель. Угловая точность 1.5"-5". Линейная точность 2мм + 2мм/км.

Geodimetr 600 S Pro фирмы Spektra Precision благодаря модульному принципу построения позволяет, например, добавить функцию автослежения, а система радиокommunikации с блоком ДУ, нарастить память и точность. Geodimetr 650 – обладает односекундной точностью. Его линейная точность 1мм + 1 мм/км.

Приборы фирмы Zeiss серии Elta S отличаются самыми мощными процессорами с операционной средой DOS, комплектуются пакетами специальных программ, например специальный пакет для разбивки дорожного полотна, наблюдения за деформациями или обработки круговых приемов. Фирма комплектует приборы этой серии системами автоматизации геодезических измерений; системой быстрого поиска отражателя, представляющей собой высокоскоростной круговой датчик; системой точного наведения, дающей секундную точность на 1 км; системой указания направления и др. Угловая точность 1"-3", линейная точность 1мм+ 2 мм/км.

Способы высокоточных угловых измерений. При измерении горизонтальных углов возможны две принципиальные схемы: измерение собственно отдельных углов, измерение направлений.

Измерение направлений заключается в поочередном наведении трубы на все визирные цели, наблюдаемые с одного пункта, отсчете по закрепленному лимбу и вычислении ряда углов между начальным направлением и всеми остальными.

Измерение отдельного угла состоит в последовательном наблюдении каждой пары пунктов, отсчитывании по лимбу и вычислении разности, определяющей величину измеряемого угла.

За единицу измерения принимают прием, который состоит из совокупности измерительных операций, выполняемых в определенном порядке для получения одного значения измеряемого угла или направления. Этот порядок устанавливают таким образом, чтобы в максимальной степени ослабить влияние различных источников ошибок.

Основными источниками ошибок угловых измерений являются инструментальные, личные и внешняя среда.

Влияние внешней среды существенно ограничивает точность угловых измерений, так как они проводятся в приземном слое атмосферы, который непрерывно изменяется в течение суток. Приземные слои атмосферы более насыщены водяными парами, пылью, дымом и под влиянием солнечного нагрева поверхности меняют оптические свойства: преломление, отражение, поглощение и рассеивание световых лучей. Это обуславливает дальность видимости, яркость, отчетливость изображений.

Одними из наиболее существенных ошибок угловых измерений являются ошибки за рефракцию, конвекционные потоки воздуха, за кручение знаков, за фазы визирных цилиндров.

Рефракция – изгибание траектории световых лучей при прохождении ими слоев атмосферы различной плотности. Наблюдатель находясь в точке А видит изображение точки В не по направлению АВ, а по касательной АВ'. Мерой рефракции является угол ρ между касательной АВ' и хордой АВ.

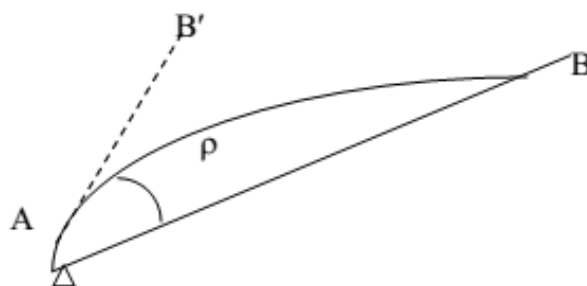


Рис. 12 – Угол рефракции

Проекция этого угла на вертикальную плоскость, проходящую через конечные точки луча АВ, называется вертикальной рефракцией, а проекция на горизонтальную плоскость – горизонтальной или боковой рефракцией. Боковая рефракция является источником случайных и систематических ошибок измерения горизонтальных углов, вертикальная – зенитных расстояний. Вертикальная - на

один-два порядка выше боковой. Наибольшее влияние на величину рефракции оказывает изменение температуры (температурный градиент). Боковая рефракция имеет, как правило, противоположные знаки в ночной и дневной периоды. Весьма целесообразными мерами ослабления боковой рефракции остаются: проектирование сетей с учетом прохождения лучей на достаточной высоте и достаточном удалении от мест, где возможно сильное рефракционное влияние; выбор периодов для наблюдений с минимальными величинами температурных градиентов; использование на каждом пункте нескольких разных, но благоприятных по метеорологическим условиям видимостей. Лучшими периодами для наблюдений можно считать конец утренней видимости, первая половина вечерней видимости, ночью через час после захода Солнца.

Конвекционные потоки воздуха возникают вследствие изменения нагрева Солнцем земной поверхности. Они приводят к колебаниям по высоте и азимуту изображения визирных целей, что затрудняет наведение на них биссектора сетки нитей.

Кручение знаков. Каждый сигнал или штатив всегда имеет некоторые малые повороты (смещение по азимуту) из-за различной деформации его отдельных частей под воздействием температурных изменений, давления ветра.

Ошибки за фазы визирных цилиндров – явление неравномерного освещения их солнцем, вследствие чего происходит систематический сдвиг наблюдаемой оси симметрии визирного устройства. Если одна половина цилиндра освещается, а другая находится в тени, то при проектировании его на темном фоне будет видна только светлая часть, а при проектировании на светлый – темная. Для наблюдений используют малофазные цилиндры, например конструкции В.Н. Шишкина.

Установка теодолита и марок. Устойчивая установка теодолита на знаке и штативе – одно из главных условий для получения результатов измерений высокой точности.

Влияние температуры на теодолит. Все высокоточные теодолиты весьма чувствительны к изменением температуры. Более эффективным средством уменьшения влияния температуры является термостатирование теодолитов, т. е. защита его от прямого воздействия солнечных лучей.

Высокоточные измерения в геодезических сетях выполняют в периоды так называемого выгоднейшего времени наблюдений, когда колебания изображений визирных целей незначительны, прозрачность атмосферы и условия видимости наилучшие, а влияние боковой рефракции мало. Такие условия имеют место утром и вечером в часы, когда в слое воздуха на высоте визирного луча наблюдается состояние, близкое к изотермии. Продолжительность благоприятного для наблюдений времени зависит от температуры воздуха, облачности, высоты визирного луча.

Из применяемых в производстве способов измерения горизонтальных углов наиболее распространенными (основными) являются способ Шрейбера (измерение отдельных углов во всех комбинациях из n направлений по два) и способ Струве (измерение круговыми приемами). Все другие являются модификациями

основных способов и имеют целью в той или иной степени ослабить недостатки основных.

Суть способа круговых приемов заключается в следующем. При неподвижном лимбе вращают алидаду теодолита по ходу часовой стрелки и последовательно наводят зрительную трубу на наблюдаемые пункты, заканчивая повторным наведением на начальное направление (замыкание горизонта). Данный комплекс измерений составляет первый полуприем. Затем трубу переводят через зенит и, вращая алидаду против часовой стрелки, наводят трубу на те же пункты, но в обратной последовательности – второй полуприем.

По каждому направлению из двух полуприемов выводят среднее. Таких приемов делают несколько: на пунктах триангуляции 2, 3 и 4 классов соответственно – 12, 9, 6, а в сетях полигонометрии – 18, 12 и 9.

Средние значения направлений приводят к начальному. Для этого из отсчета по данному направлению вычитают отсчет начального. Окончательное значение направлений на пункте получается после уравнивания на станции, которое состоит в простом выводе среднего арифметического из всех m приемов.

Между приемами лимб переставляют на угол

$$\delta = 180^\circ / m + i, \quad (26)$$

где m - число приемов, i - цена деления лимба теодолита.

Для оценки точности вычисляют отклонения значения данного направления в каждом приеме v от среднего арифметического, образуя из них сумму квадратов, и вычисляют среднюю квадратическую погрешность направления, выведенного из одного приема – ошибку единицы веса по формуле Петерса

$$\mu = \frac{\sum |v|}{n} k, \quad (27)$$

где n - число направлений на станции; m - число приемов; $k = 1.25 / \sqrt{m(m-1)}$.

Средняя квадратическая ошибка уравненного из m приемов направления будет

$$M = \mu / \sqrt{m}. \quad (28)$$

Достоинства способа:

простота производства наблюдений в приеме, ускоряющая процесс измерений;

малое число перестановок круга, не требующее составления специальной программы;

большой ряд непосредственно измеренных значений углов.

Недостатки способа:

требование наличия одновременной видимости по всем направлениям;

неравноточность начального и остальных направлений. На начальное производится в два раза больше наведений, в результате чего углы, образованные с ним, имеют меньшие ошибки;

сравнительно большая продолжительность измерений в приеме.

Способ измерения углов во всех комбинациях был предложен Гауссом, усовершенствован немецким геодезистом Шрейбером, применившим его в прусской триангуляции 1868-1874 г. Способ заключается в измерении на пункте от-

дельных углов между двумя направлениями, образующими между собой всевозможные комбинации. Количество таких углов при n направлениях будет равно

$$\frac{n(n-1)}{2}. \quad (29)$$

Число приемов для наблюдения углов на данном пункте в каждом конкретном случае определяют в зависимости от числа направлений

$$m = P/n, \quad (30)$$

где P – вес измерений, регламентированный Инструкцией [].

Для триангуляции 1 класса $P= 35-36$, для 2 класса – 24.

Значение каждого угла можно получить трижды: одно- непосредственно измеренное и два – как сумма или разность двух других непосредственно измеренных углов.

$$(1.2) = (1.4) - (2.4) = (1.3) - (2.3);$$

$$(1.3) = (1.4) - (3.4) = (1.2) + (2.3)$$

Для ослабления влияния погрешностей делений лимба и в целях получения независимых результатов углы измеряют на разных установках горизонтального круга. Лимб между приемами переставляют на угол

$$\delta = \frac{180^0}{m} + i, \quad (31)$$

а между группами не примыкающих друг к другу углов в приеме на угол

$$\delta = \frac{\sigma}{n-1} + i, \quad (32)$$

при n - четном числе направлений;

и

$$\delta = \frac{\sigma}{n} + i \quad (33)$$

при n - нечетном.

На каждом пункте составляется программа наблюдений. Делают расчет таблицы рабочих установок лимба. При этом можно воспользоваться таблицами установок лимба, приведенными в Инструкции

Измерение угла проводится в следующей последовательности. При КЛ наводят биссектор зрительной трубы на визирную цель левого предмета, по лимбу устанавливают отсчет, соответствующий установке данного угла для данного приема.

Открепив алидаду, по часовой стрелке наводим на визирную цель левого направления. Дважды берем отсчет. Данные действия составляют первый полуприем.

Второй полуприем. Переводят трубу через зенит, и вращая алидаду по ходу часовой стрелки, наводят биссектор зрительной трубы на визирную цель правого предмета. Берут отсчет. Открепив алидаду и вращая ее по ходу часовой стрелки, наводят зрительную трубу на визирную цель левого предмета. Отсчет.

Данный способ дает возможность измерять углы в любой последовательности, выбирая для них наиболее благоприятные условия видимости. И не требует видимости одновременно по всем направлениям. Общее время длительности од-

ного приема значительно меньше, чем при способе круговых приемов. В способе Шрейбера погрешности делений лимба исключаются полней, чем в способе Струве, так как значительно увеличивается число перестановок лимба.

Обработка результатов угловых измерений заключается в выводе среднего значения угла, полученного из двух полуприемов. Находят среднее значение угла по значениям угла полученного из непосредственных измерений и значениям угла, полученного как разность или сумма других углов. Для каждого угла вычисляют разность между непосредственно измеренным его значением и уравненным (v) и производят оценку точности.

Средняя квадратическая погрешность угла из одного приема вычисляется по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{2m\sum v^2}{(n-1)(n-2)}} \quad (34)$$

Средняя квадратическая погрешность направления, уравненного на станции равна

$$M = \frac{\mu}{\sqrt{mn}}. \quad (35)$$

Определение элементов приведения

Направления, измеренные на пунктах государственной сети, должны быть приведены к центрам знаком. Это выполняется путем введения в них поправок за центрировку и редукцию.

Поправка за центрировку рассчитывается в связи с внецентренным расположением вертикальной оси прибора, за редукцию из – за несовпадения оси симметрии визирной цели с центром марки.

Для вычисления этих поправок необходимо знать взаимное расположение оси вращения теодолита I , оси визирной цели V и центра знака O и их ориентировку относительно сторон геодезической сети. Это возможно, если известны угловые (θ и θ_1) и линейные (l и l_1) элементы центрировки и редукции – элементы приведения.

Определение элементов приведения определяется графическим, аналитическим способами и способом непосредственного измерения элементов приведения.

Определение элементов приведения графическим, способом выполняется в следующей последовательности. С трех установок вспомогательного теодолита, на расстоянии примерно в полтора раза большем, чем высота геодезического знака, проектируют ось вращения теодолита и ось визирного цилиндра на центрировочный лист, прикрепленный на мензулу. Мензула устанавливается над центром пункта. Аналогичным образом, устанавливая теодолит на расстоянии от центра пункта, с которого видна марка центра, при трех установках проектируют центр пункта. При этом образуются треугольники погрешностей, стороны которых не должны превышать: 3 мм при проектировании центра пункта, 5 мм – при проектировании оси теодолита и 10 мм – при проектировании оси визирной цели.

Из точек I и V на центрировочном листе проводят направления на начальный пункт A и какой-либо пункт B . Точки I и V соединяют с точкой O и линейкой измеряют с точностью до 0.001 м линейный элемент центрировки $l = OI$ и линейный элемент редукции $l_1 = OV$. В точках I и V измеряют углы θ и θ_1 по ходу часовой стрелки от направления на центр пункта.

Поправка за центрировку в измеренное направление вычисляется по формуле

$$c = \frac{l \sin(M + \theta)}{S} \rho \quad (36)$$

Поправка за редукцию-

$$r = \frac{l_1 \sin(M_1 + \theta_1)}{S} \rho, \quad (37)$$

где S - расстояние между пунктами.

Высокоточные линейные измерения. Радиоэлектронные методы измерения расстояний.

Обзор развития приборов для линейных измерений.

Современное геодезическое производство и наука невозможны без прецизионных пространственных линейных измерений.

Первоначально измерения линий проводились базисными приборами. Фундамент для развития базисных приборов был заложен Виллибродом Снеллиусом. Он измерил в 1615 году короткий базис (около 350 м) при построении сети треугольников в Нидерландах для определения длины земной окружности между Алькмааром и Бергеном-оп-Зоом.

В соответствии с историческим развитием базисные приборы классифицируются следующим образом:

Жесткие базисные приборы с мерными деревянными, а затем металлическими жезлами.

Нежесткие базисные приборы - мерные цепи, мерные ленты, приборы с подвесными мерными инварными проволоками и лентами;

Указанные средства линейных измерений относятся к механическим приборам.

Развитие жестких базисных приборов характеризовалось следующими этапами:

1. Контактные базисные приборы. Первые жезловые приборы состояли из простых деревянных жезлов, концы которых непосредственно примыкали друг к другу. Позднее появились жезлы с перекрещивающимися лезвиеобразными концами. С начала XVII в. и до середины XVIII в. базисные измерения производили почти исключительно контактным методом, и этот метод совершенствовался и развивался соответственно уровню науки и техники.

2. Базисные приборы с измерением интервалов. При измерении интервалов мерные жезлы контактировались таким образом, что между их концами оставались маленькие промежутки, которые измерялись специальными средствами.

3. Измерение способом совпадений. В данном способе штриховые жезлы располагались таким образом, что начальный штрих одного из них был продолжением конечного штриха другого.

4. Биметаллические базисные приборы. В данном методе была решена проблема учета изменения длины жезла под действием температуры.

5. Приборы с оптическим совмещением.

Жезлы использовались до конца XIX века (а в Германии, Бельгии, Дании, Италии и Австрии до 30 – х годов XX века) для высокоточного измерения линий на местности. В настоящее время при монтаже и наблюдениях за осадками и смещениями технологического оборудования для измерения коротких длин линий с высокой точностью используются мерные концевые и штрихо – концевые жезлы. При длине жезла 1 м средняя квадратическая ошибка измерения составляет 15 мкм.

Предшественниками базисных приборов с инварными проволоками были мерные ленты и цепи.

В 1880 г. Эдвард Едерин предложил метод высокоточных линейных измерений стальной лентой, находящейся под постоянным натяжением. Это произвело коренные изменения в развитии базисных приборов.

Новые перспективы измерения проволоками открылись в 1887 г., когда Рене Бенуа и Ш. Эд. Гильомом был изобретен новый сплав, названный «инваром».

Вторую группу современных средств линейных измерений представляют физико-оптические приборы, которые разделяются на оптические и радиофизические дальномеры.

Измерение расстояний оптическими дальномерами основано на использовании принципов геометрической оптики. Оптические дальномеры подразделяются на две основные группы: дальномеры с постоянным углом и дальномеры с постоянным базисом. Значительным шагом в области создания первых советских оптических дальномеров была насадка ДНБ – 2, разработанная В.А. Белициным совместно с ЦНИИГАиК в 1947 году. После этого создан ряд совершенных оптических дальномеров, которые нашли широкое распространение при выполнении различных геодезических работ. Оптические дальномеры являются в основном насадками на трубу геодезического прибора (теодолита, тахеометра).

В основе радиоэлектронных методов измерения расстояний лежит свето- и радиолокация, т.е. определение направления, расстояния и местоположения различных объектов по отраженным от них или испускаемым ими свето- и радиоволнам.

От длины волны электромагнитных колебаний зависит характер распространения их в земной атмосфере. Поэтому в геодезических целях используются радиоволны- от длинных волн до волн сантиметровой и миллиметровой длины и волны инфракрасного и видимого участков спектра.

В 1930 году советскими академиками Л. И. Мандельштамом и Н.Д. Папалески были предложены методы измерения расстояний, основанные на использовании фазовых соотношений радиоволн. В результате в 30-х годах в СССР был создан и испытан ряд радиогеодезических систем (радиолаг, радиодальномер, фазовый зонд). Развитие по конструированию и совершенствованию радиогеодезических дальномерных систем привело к созданию ряда высокоточных геодезических радиодальномеров.

Первый светодальномер был разработан в 1936 году в Государственном оптическом институте. В 1953 году был разработан и доведен до серийного производства средний светодальномер СВВ-1, а в 1956 году высокоточный светодальномер ЭОД-1. Дальнейшее развитие светодальномерной техники было связано с работами в области создания и освоения оптических квантовых генераторов и полупроводниковых источников излучения.

В светодальномерах расстояние измеряют по времени распространения световой волны от приемопередатчика до отражателя и обратно. Если это время обозначить через τ , скорость света - c , то измеряемое расстояние D выразится формулой:

$$D = c/2 \cdot \tau + k, \quad (38)$$

где k - приборная поправка дальномера.

Время измеряют фазовым методом, при котором на дистанцию посылается поток света, модулированный (изменяющийся) по амплитуде или по плоскости поляризации. В некоторых дальномерах применяют импульсный метод измерения расстояний с преобразованием временного интервала.

В качестве модуляторов света применяют ячейку Керра с предварительной поляризацией света в одной плоскости, дифракционные модуляторы, твердые кристаллы на основе ниобата лития и других элементов, использующих пьезоэлектрический эффект.

Источником света в первых светодальномерах служили лампы накаливания и ртутные лампы, в настоящее время лазеры и полупроводниковые излучатели.

Полупроводниковые излучатели инфракрасного света (светодиоды) могут излучать модулированный свет, что позволяет обходиться без специальных модуляторов.

В светодальномере осуществляется гармоническая модуляция света, в результате чего возникает световая волна с длиной λ , равной

$$\lambda = c / \Gamma, \quad (39)$$

где Γ - частота модуляции света.

В каждый момент времени световая волна характеризуется своей фазой. Поскольку световой волне для прохождения расстояния до отражателя и обратно требуется определенное время, фаза света, прошедшего дистанцию, не совпадает с фазой света в опорном канале. Разность фаз измеряется специальным фазоизмерительным устройством, оптической линией задержки, фазовращателем или цифровым отсчетным устройством.

Приемником света может служить глаз наблюдателя, фотоумножитель или фотосопротивление.

Разность фаз гармонического колебания меняется циклически, а непосредственное ее измерение возможно в пределах одного фазового цикла (длина полу волны модуляции света). Поэтому для определения полного расстояния измеряют разности фаз колебаний на нескольких известных частотах модуляции, либо плавно изменяя частоту модуляции в пределах определенного диапазона, находят число полных фазовых циклов.

Для уменьшения вредного влияния высокочастотных наводок фазовые измерения в светодальномере производятся на низкой промежуточной частоте. Для чего, помимо генератора основных масштабных частот, имеется генеоатор гетеродинных частот. Разность основных и гетеродинных частот составляет промежуточную частоту. Значения основных масштабных частот в различных светодальномерах находятся в пределах от 4 до 750 МГц, значение промежуточной частоты составляет 15 – 100 КГц.

При импульсном методе измерений сигналы посылаются серией коротких импульсов, а промежуток времени прохождения ими искомого расстояния измеряется непосредственно. Оптические квантовые генераторы, излучающие световые импульсы малой длительности и высокой когерентности легли в основу создания высокоточных импульсных лазерных дальномеров.

В основу светодальномеров положен принцип локации объектов с помощью электромагнитных волн и определения времени их распространения. В данном

случае электромагнитная энергия представляет собой световой поток. Источником электромагнитных колебаний служат лазерные источники света и полупроводниковые светодиоды. Появление светодальномеров произвело революцию в линейных измерениях, позволив отказаться от трудоемких механических базисных измерений.

К приборам, реализующим электронные методы измерения расстояний относятся также электронные тахеометры, получившие на сегодняшний день широкое распространение.

Впервые термин «электронный тахеометр» прозвучал в геодезическом мире в 1971 году, когда появились новые измерительные инструменты, объединившие в себе светодальномер, цифровой теодолит с электронным измерением углов и модуль памяти для сохранения результатов измерений. Это были Geodimeter – 700 и Reo Eita 14 известных во всем мире компаний Geotronics AB (Швеция) и Opton (Германия).

Современные электронные тахеометры – сложные оптико-электронные приборы, интегрирующие последние технические достижения ведущих мировых фирм в области электроники, оптики, точной механики, лазерной техники, информационных технологий. Это multifunctional приборы, позволяющие производить угловые и линейные измерения с возможностью полной дальнейшей автоматизации обработки результатов измерений. Электронный тахеометр объединяет в себе возможности электронного теодолита, электронного высокоточного дальномера и полевого компьютера.

Широкое внедрение современной микроэлектроники в приборостроение привело к быстрому развитию электромагнитных методов измерения расстояний. Появляется новое поколение электронных тахеометров. В конце 90-х годов XX века появились серийные модели безотражательных приборов. Эти принципиально новые приборы, обладающие уникальными свойствами, в настоящее время, наряду с традиционными электронными тахеометрами находят широкое применение при съемке открытых разработок полезных ископаемых, реконструкции и строительстве новых дорог, при съемке промышленных объектов. Их преимущества очевидны: съемка выполняется без помощника, расстояние можно измерять до таких точек, на которые отражатель установить проблематично. К таким тахеометрам относятся, например, серии тахеометров GPT – 8200 и GPT – 7000 фирмы Topcon (США), SET 330R, SET 530R, SET 630R фирмы SOKKIA (Япония). Новый лазерный дальномерный модуль тахеометра GPT – 7000 оснащен высококачественной оптической системой и современным импульсным лазером. Безотражательные измерения выполняются на расстояниях до 250 м, при использовании отражателя – до 3 км.

Ведущие производители электронных тахеометрических систем: Spektra Precision (Швеция/Германия), Leika (Швейцария), Sokkia, Topcon, Nikon, Rentax (Япония), выпускающие около 100 моделей и модификаций электронных тахеометров, рассматривают последние как геодезические системы первичного значения, функциональные возможности которых дополняются возможностями спутниковых приемников.

Современный электронный тахеометр можно рассматривать и как прибор для измерения расстояний с различной точностью: от 1 мм + 1ppm при дальности 3000 м и ниже.

К радиоэлектронным методам измерения длин линий можно отнести и длиннобазисную квазарную радиоинтерферометрию. Идея данного метода предложена в 1965 году советскими радиоастрономами Л.И. Матвиенко, Н.С. Кардашевым и Г.Б. Шоломицким. Принцип использования радиоинтерферометрических наблюдений квазаров в геодезических целях основан на следующем эффекте. Сигналы от квазаров на антенны радиотелескопов, разнесенных на большое расстояние (до 2000 км), поступают не одновременно, а с некоторым временным запаздыванием, обусловленным разностью расстояний от базисных пунктов радиоинтерферометрии до квазара.

Классификация приборов для линейных измерений показана на рис. 13.

Как в триангуляции, так и в полигонометрии измерение длин линий является одним из основных процессов создания геодезической опорной сети в единой системе мер на всей территории государства.

Высокоточные линейные измерения в государственных геодезических сетях проводят либо в виде базисных измерений в триангуляции, либо в виде непосредственного измерения сторон полигонометрии высших классов.

Для непосредственного измерения длин линий в зависимости от требуемой точности, используют разные измерительные приборы и разную технологию измерений. Непосредственное измерение длин линий в течении долгого времени было единственным способом различных высокоточных измерений длин базисов, базисных сторон и длин линий полигонометрии. Наивысшая точность линейных измерений в геодезии, характеризующаяся относительной погрешностью 1:1 000 000 достигается только при помощи базисного прибора с инварными проволоками (прибор Едерина).

Базисный прибор Едерина выпускается под марками БП-1, БП-2, БП-3. Высокоточные измерения выполняются прибором БП-1. Базисный прибор Едерина состоит из мерных проволок, штативов с марками (целиками), из вспомогательных приборов для центрирования, нивелирования и провешивания. Мерные проволоки изготавливают из инвара – сплава, состоящего из 36% никеля и 64% железа с очень малым коэффициентом линейного расширения. Современными приборами для измерения длин линий являются свето и радио – дальномеры, появившиеся в 70-х годах XX века. Принцип измерения расстояний дальномерами состоит в измерении промежутка времени τ , необходимого для прохождения электромагнитными волнами (световыми или радиоволнами) измеряемого расстояния D в прямом и обратном направлениях.

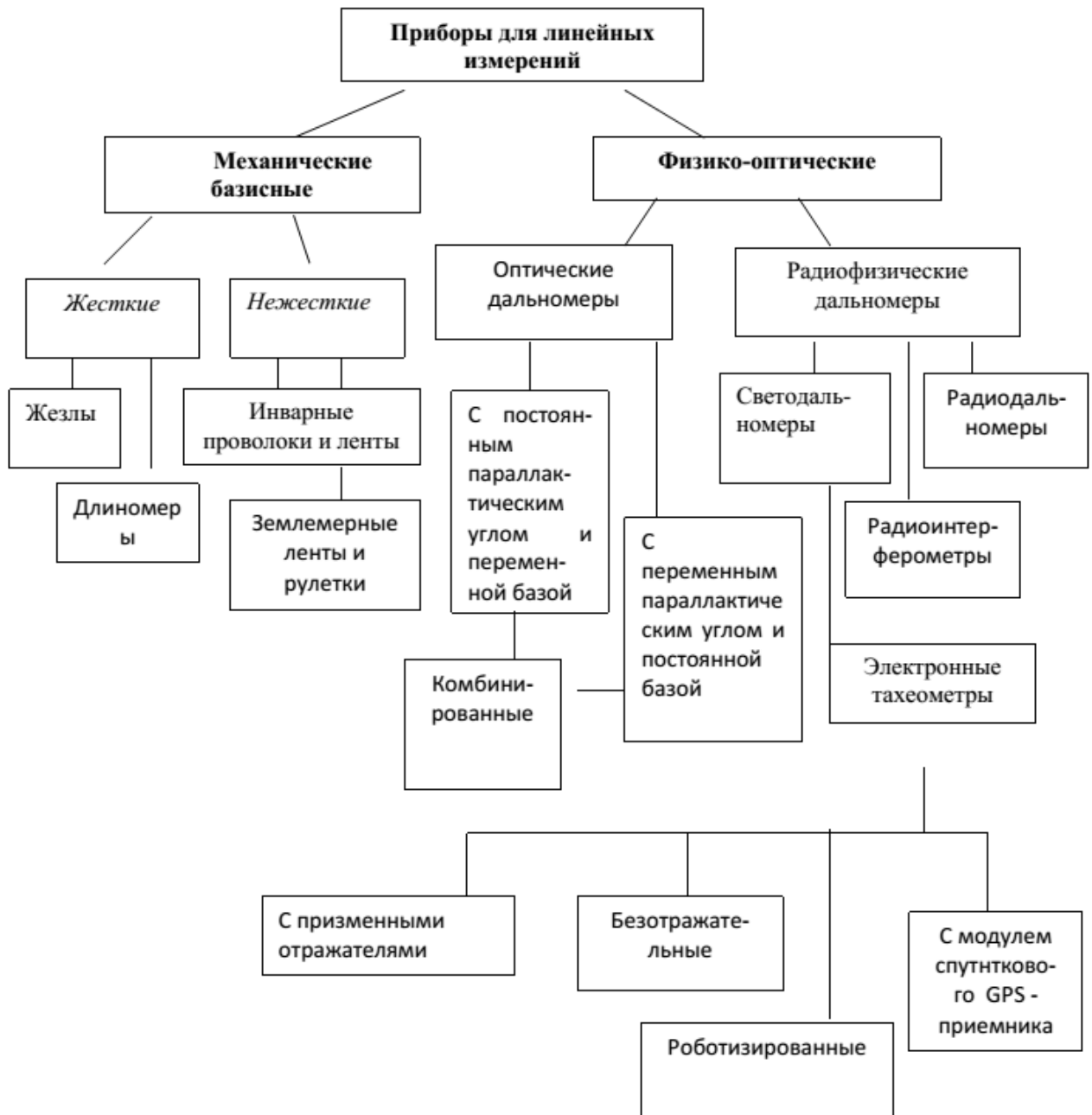


Рис. 13 - Классификация приборов для линейных измерений

Если скорость распространения электромагнитных колебаний v известна, то $D = v\tau/2$. (40)

Геодезические радиодальномеры предназначены для измерения расстояний от нескольких сотен метров до нескольких десятков км с точностью 2/200 000-1/300 000.

Геодезические светодальномеры служат для измерения базисных сторон в триангуляции 1 и 2 классов и сторон полигонометрии 1 и 2 классов. Они позволяют измерять расстояния от 0.5 до 50 км с относительной ошибкой 1/400 000-1/500 000.

Точность измерения расстояний светодальномерами несколько выше точности измерения расстояний радиодальномерами.

Для измерений длин линий в геодезических сетях 1 и 2 классов предназначен светодальномер «Кварц», в сетях 2 класса – СГ –3. Светодальномер «Геодиметр 600» фирмы «АГА Геотроник» (Швеция) предназначен для измерения расстояний до 60 км в геодезических сетях и на геодинамических полигонах.

В 1965 г. советскими радиоастрономами Л.И. Матвиенко, Н.С. Кардашевым и Г.Б. Шоломицким была высказана идея метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ). Принцип использования радиоинтерферометрических наблюдений квазаров в геодезических целях основан на следующем эффекте. Сигналы от квазаров на антенны радиотелескопов, разнесенных на большое расстояние, поступают не одновременно, а с некоторым относительным временным запаздыванием τ , обусловленным разностью расстояний от базисных пунктов радиоинтерферометрии (РИ) до квазара. По известным направлениям на квазар можно определить: длину базы, углы характеризующие направление базы с точностью до сотых долей угловой секунды; скорость вращения Земли, движения литосферных плит. Метод длиннобазисной радиоинтерферометрии используется для контроля и повышения точности геодезических сетей, определения движения полюсов Земли, взаимного перемещения блоков земной коры.

Предварительные вычисления. Уравнивание сети коррелятным и параметрическим способами.

Одним из основных этапов математической обработки результатов измерений в триангуляции является *предварительная обработка материалов наблюдений*.

Целью предварительных вычислений в триангуляции является определение качества полевых измерений, т.е. всесторонний анализ результатов измерений и их контроль по свободным членам условных уравнений, которые сравнивают с установленными допустимыми их значениями.

В результате предварительных вычислений измеренные в сети величины приводятся к центрам пунктов и редуцируются на плоскость в проекции Гаусса-Крюгера или на поверхность референц-эллипсоида.

Предварительные вычисления в триангуляции при редуцировании их на плоскость в проекции Гаусса-Крюгера включают следующее:

Проверка и обработка полевых материалов (журналы, листы графического определения элементов приведения центрировки и редукации);

Составление сводок измерения углов или направлений и уравнивание их на станции с оценкой точности;

Подготовка исходных данных;

Предварительное решение треугольников и вычисление сферических избытков;

Вычисление поправок в направления за центрировку и редукацию;

Вычисление приближенных прямоугольных координат пунктов;

Вычисление поправок за кривизну изображения геодезической линии на плоскости в проекции Гаусса-Крюгера;

Составление сводок направлений, приведенных к центрам знаков и редуцированных на плоскость;

Подготовка исходных данных

Перед началом предварительных вычислений составляется «Список исходных данных», который содержит:

- прямоугольные координаты исходных пунктов;
- дирекционные углы и длины сторон между исходными пунктами.

Исходные данные могут быть в геодезической системе координат, в местной системе. В этом случае нужно решить задачу перехода от местных или геодезических координат к прямоугольным. Определение длин исходных сторон и их дирекционных углов выполняется из решения обратной геодезической задачи по формулам

$$tq\alpha_{in} = \frac{y_n - y_i}{x_n - x_i} . \quad (41)$$

$$S_{in} = \frac{y_n - y_i}{\sin \alpha_{in}} = \frac{x_n - x_i}{\cos \alpha_{in}} = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2} . \quad (42)$$

Предварительное решение треугольников и вычисление сферических избытков.

В процессе предварительного решения треугольников определяются их длины сторон и сферические избытки. Длины сторон треугольников необходимы для вычисления поправок в измеренные направления за центрировки теодолита и редукиции визирных целей.

При решении треугольников целесообразно придерживаться следующих рекомендаций:

- выделить на схеме сети цепочку последовательного решения треугольников и пронумеровать их по порядку. Треугольники, не попадающие в эту цепочку, нумеруются и решаются последними;

- в каждом треугольнике на первом месте выписывается номер вершины того угла, который лежит против исходной стороны, а на последнем – против стороны, которая служит исходной для решения следующего треугольника.

Вычисление длин сторон в треугольниках выполняется по теореме синусов

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}, \quad (43)$$

откуда, приняв сторону a за исходную, находят длины других сторон

$$q = \frac{a}{\sin A}, \quad b = q \sin B; c = q \sin C \quad (44)$$

Сферический избыток треугольника со сторонами a , b и c вычисляют по формуле

$$\varepsilon = f a b \sin C, \quad (45)$$

где стороны a и b выражают в километрах. Коэффициент f принимают равным $f = 0.00253$.

Вычисление поправок за центрировку и редукицию

На пункте триангуляции, как правило, проекции точки J стояния теодолита, визирной цели знака V и его центра O на горизонтальную плоскость не совпадают между собой. В связи с этим все измеренные в точке J направления должны быть приведены к центру знака в точке O , т.е. исправлены поправками c'' за центрировку теодолита. Эти поправки прибавляют со своими знаками к измеренным на данном пункте направлениям.

Поправки r'' за редукицию визирной цели данного пункта вводятся со своим знаком в обратные направления, идущие с других пунктов на данный пункт, поскольку визирование из точек производится не на центр знака, а на его визирную цель.

Вычисление приближенных прямоугольных координат

Чтобы получить сеть, редуцированную на плоскость, требуется, прежде всего, привести на плоскость измеренные направления, исправив их поправками за кривизну изображения геодезической линии на плоскости. Для этого надо полу-

чить сначала приближенные координаты всех пунктов сети. Вычисление этих координат производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} X_n &= X_i + S_{in} \cos \alpha_{in}, \\ Y_n &= Y_i + S_{in} \sin \alpha_{in} \end{aligned} \right\} (46)$$

Координаты каждого последующего пункта вычисляют с контролем по двум сторонам треугольника. Расхождения в дважды вычисленных значениях координат не должны превышать 1 метра.

Вычисление поправок в направления за кривизну изображения геодезической линии на плоскости

Стороны треугольников на плоскости в проекции Гаусса-Крюгера изображаются, как и на эллипсоиде, кривыми линиями. Решение на плоскости криволинейных треугольников неудобно, поэтому вершины треугольников соединяют прямыми линиями – хордами (рисунок) и для решения таких треугольников применяют простые формулы аналитической геометрии на плоскости. Необходимо от углов между кривыми линиями перейти к углам между хордами, соединяющими их концы. Для этого в каждое измеренное направление вводят поправку δ_{ik} за кривизну изображения геодезической линии на плоскости. Поправки в прямое и обратное направления вычисляют в триангуляции 2-4 классов по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{ik} &= \frac{f}{3} (X_i - X_k)(2Y_i + Y_k), \\ \delta_{ki} &= -\frac{f}{3} (X_i - X_k)(2Y_k + Y_i), \end{aligned} \right\} (47)$$

где X и Y – приближенные координаты пунктов на плоскости, выраженные в километрах.

В формулах (47) ординаты Y отсчитываются от осевого меридиана. Другими словами, их необходимо привести к не преобразованному виду: опустить номер зоны и вычесть 500 км.

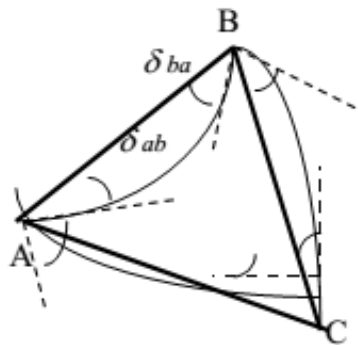


Рис.14 – Поправки за кривизну изображения геодезической линии на плоскости

Так как поправки за кривизну необходимы для замены криволинейных сторон треугольников в прямолинейные, то после введения поправок сумма углов треугольников уменьшится на его сферический избыток ε . Контролем правильности вычислений поправок δik в направления будет равенство

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = -\varepsilon, \quad (48)$$

где δi – поправка в угол треугольника, вычисляемая как разность поправок δik в правое и левое направления.

Составление сводок направлений, приведенных к центрам знаков и редуцированных на плоскость

Составление сводки направлений заключается в вычислении измеренных направлений, исправленных поправками за центрировку c'' и редуциацию r'' (направления, приведенные к центрам знаков) и поправками за кривизну изображения геодезической линии на плоскости δik (направления редуцированные на плоскость). Составление такой сводки является заключительным этапом предварительных вычислений. Она является исходным документом при уравнивании триангуляции и должна быть составлена безошибочно.

Уравнивание геодезических сетей коррелятным способом

После предварительных вычислений, т.е. когда получены направления приведенные к центрам знаков и редуцированные на плоскость, приступают к уравнивательным вычислениям. Уравнивание производится с целью получения наиболее надежных значений определяемых величин, повышения их точности, а также для оценки точности измеренных величин и их функций.

Уравнивательные вычисления могут быть проведены только в том случае, если измерений выполнено больше, чем нужно для определения искомым величин, т.е. когда имеются избыточные измерения.

Известны два классических способа уравнивания геодезических сетей по методу наименьших квадратов: коррелятный (способ условных измерений) и параметрический (способ посредственных или косвенных измерений).

В коррелятном способе решается задача на условный экстремум определения функции $\sum pv^2 = \min$ с использованием вспомогательных неизвестных – коррелят. При этом составляют независимые условные уравнения, вытекающие из геометрических соотношений в сети. Из уравнивания отыскивают поправки к непосредственно измеренным величинам (углам, направлениям или сторонам).

Математические соотношения, определяющие условные уравнения, зависят от того свободная сеть или несвободная. Свободными называются сети, имеющие только необходимое число исходных данных. В триангуляции это сети, имеющие один исходный пункт, одну исходную сторону с измеренной длиной и азимутом или координаты только двух исходных пунктов.

Несвободными называются сети, имеющие избыточное число исходных данных, а именно: координаты нескольких несмежных расположенных пунктов, два или более азимутов и базисов.

Для определения числа и вида независимых условных уравнений, возникающих в сети триангуляции при уравнивании направлений, используют следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} \text{всего уравнений } S_n &= D^* - 2k - t; \\ \text{уравнений фигур } f &= D - p - t + 1; \\ \text{полусных уравнений } c &= p - 2n + 3; \\ \text{базисных уравнений } r_b &= k_b - 1; \\ \text{дирекционных углов } r_D &= k_D - 1; \\ \text{абсцисс и ординат } r_{X,Y} &= 2(k_{X,Y} - 1), \end{aligned} \right\} (49)$$

где $D^* = D + k\alpha + kS$.

D – число измеренных направлений в сети;

$k\alpha$ и kS – число дополнительно измеренных, но не вычисленных по координатам, сторон и азимутов соответственно;

n – число всех пунктов в сети;

k – число определяемых пунктов;

t – число пунктов, на которых выполнялись угловые измерения;

p – число всех сторон в сети;

kS – общее число базисных сторон, вычисленных по координатам, и измеренных;

kD – общее число дирекционных углов, вычисленных по координатам, и измеренных азимутов;

$k_{X,Y}$ – число отдельных групп исходных пунктов, не связанных между собой жесткими сторонами. Отдельная группа может состоять либо из одного пункта, либо из ряда смежных пунктов с заданными координатами. Координатные условия возникают только в том случае, когда между разными группами исходных пунктов имеется не менее двух определяемых сторон.

Составление условных уравнений и определение допустимых величин свободных членов условных уравнений.

Условия фигур возникают в замкнутых геометрических фигурах со всеми измеренными углами и основаны на том, что сумма углов любого многоугольника равна

$$\sum \beta = 180^\circ (n - 2), \quad (50)$$

где n – число вершин многоугольника.

Однако вследствие ошибок измерений сумма углов n - многоугольника, составленная из измеренных величин, никогда не будет равняться теоретическому значению.

Условие фигур треугольника, состоящее в том, что сумма углов равна 180° , будет соблюдено, если всем измеренным углам придать соответствующие поправки (1), (2), (3)

$$(1) + (2) + (3) = w, \quad (51)$$

где w – невязка треугольника

$$w = 180^{\circ} - (1 + 2 + 3) \quad (52)$$

Полюсные условия. Полюсное условие возникает в центральных системах и геодезических четырехугольниках. Оно заключается в том, что в уравненной сети длины одной и той же стороны, вычисленные дважды из решения различных треугольников должны совпадать. При составлении полюсного условия вначале выбирается полюс. В геодезическом четырехугольнике — это вершина с наиболее тупым углом, в центральной системе — центральный пункт.

Полюсное условие составляют с отношения сторон, исходящих из точки плюса, начиная и заканчивая одной и той же стороной, а затем заменяя отношения сторон отношением синусов противолежащих в данном треугольнике углов. Обозначив через β_i и β_j углы треугольников в числителе и знаменателе, а через Π_1 и Π_2 — соответственно произведения синусов измеренных значений этих углов, напишем полюсное условное уравнение в линейном виде:

$$\sum ctq\beta_i(\beta_i) - \sum ctq\beta_j(\beta_j) + w = 0, \quad (53)$$

где

$$w = \frac{\Pi_1 - \Pi_2}{\Pi_1} \rho'' . \quad (54)$$

Контроль: сумма коэффициентов при поправках должна быть равна нулю.

При уравнивании направлений поправки в углы заменяются разностью поправок в направления: поправка правого направления минус поправка левого направления.

Свободные члены полюсных условий в геодезических четырехугольниках и центральных системах должны быть не более

$$w_{дон.} = 2,5m'' \sqrt{\sum ctq^2 \beta} , \quad (55)$$

где $\sum ctq^2 \beta$ - сумма квадратов котангенсов связующих углов треугольников, m'' - средняя квадратическая ошибка измерения углов.

Базисное условие возникает при наличии в сети избыточных исходных сторон и заключается в том, что в уравненной сети вычисленное значение какой-либо исходной стороны от стороны принятой за начальную, должно в точности равняться ее заданной (измеренной) величине.

По внешнему виду это условие не отличается от полюсного условия и в линейном виде запишется так

$$\sum ctq\beta_i(\beta_i) - \sum ctq\beta_j(\beta_j) + w = 0, \quad (56)$$

где

$$w = \rho''(S_{23} - S'_{23})/S'_{23};$$

$$S'_{23} = S_{12} (\Pi_1/\Pi_2).$$

Здесь через β_i и β_j обозначены углы треугольников в числителе и знаменателе (связующие углы). Углы числителя лежат против определяемых сторон, углы знаменателя – против исходных сторон.

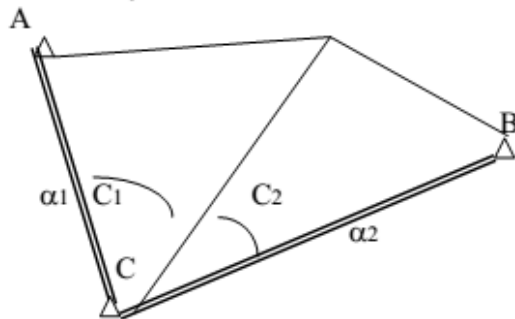
Π_1 и Π_2 – соответственно произведения синусов числителя и знаменателя измеренных значений этих углов. При уравнивании направлений поправки в углы заменяются разностями поправок направлений.

Перед вычислением коэффициентов и свободного члена базисного условия его записывают через синусы уравниваемых углов.

Значение свободного члена базисного условия не должно превышать величины, вычисленной по формуле

$$w = 2,5 \sqrt{\left(\frac{b_2}{\rho} m\right)^2 \sum ctq^2 \beta + 2m_b^2} \quad (57)$$

Условное уравнение дирекционных углов возникает в сети при наличии избыточного числа исходных дирекционных углов (непосредственно измеренных или вычисленных). При составлении условия дирекционных углов выбирают ходовую линию через промежуточные углы треугольников, служащие для передачи дирекционного угла от дирекционного угла одного исходного направления к дирекционному углу другого исходного направления. При вставке в жесткий угол условие дирекционных углов имеет вид



$$(C_1) + (C_2) + w = 0 \quad (58)$$

$$w = C'_1 + C'_2 - (\alpha_2 - \alpha_1),$$

где C'_1 и C'_2 – измеренные углы.

Рис. 15 – Уравнение дирекционного угла

$$w_A = 2,5 \sqrt{m^2 n + 2m_\alpha^2}, \quad (59)$$

где m_α - реальная точность измерения азимутов на пунктах Лапласа, равная 1.1".

Уравнивание геодезических сетей параметрическим способом

Из существующих способов уравнивания геодезических сетей наиболее целесообразным считается параметрический, так как он может быть легко реализован на ЭВМ.

В параметрическом способе решается задача на абсолютный экстремум – отыскание минимума функции $\sum pv^2 = \min$. В качестве неизвестных в нем выбираются такие неизвестные параметры, в функции которых могут быть выражены

все измеренные величины. При этом составляют уравнения поправок и из уравнения находят сначала поправки к этим параметрам, являющиеся функциями непосредственно измеренных величин, а затем поправки к самим измеренным величинам.

Уравнения поправок устанавливают связь поправок в измеренные величины с поправками в приближенные значения параметров.

Для параметрического способа уравнивания сети триангуляции характерна следующая последовательность уравнивательных вычислений:

- вычисление приближенных координат определяемых пунктов с возможно большей точностью;
- вычисление приближенных дирекционных углов всех сторон путем решения обратных геодезических задач;
- составление уравнений поправок направлений и функций уравненных элементов сети;
- составление и решение нормальных уравнений поправок координат;
- вычисление окончательных значений координат пунктов путем исправления их приближенных значений поправками, полученными из решения нормальных уравнений;
- вычисление поправок ориентирования на станциях и поправок измеренных направлений; окончательное решение треугольников;
- вычисление дирекционных углов, приращений координат и вторичное определение окончательных координат определяемых пунктов;
- оценка точности уравненных элементов сети.

Составление параметрических уравнений поправок для направлений

Уравнения поправок составляют для всех измеренных направлений в сети.

Уравнения поправок в измеренные направления имеют вид:

$$v_{ik} = -\delta z_0 - a_{ik}\xi_i - b_{ik}\eta_i + a_{ik}\xi_k + b_{ik}\eta_k + l_{ik}, \quad (60)$$

где i, k - номера определяемых пунктов,

δz_0 - поправка ориентирующего направления z_i на i -том пункте;

a_{ik} и b_{ik} - коэффициенты уравнений поправок;

$\xi_{i(k)}, \eta_{i(k)}$ - поправки в приближенные координаты, выраженные в дециметрах

$$\xi = 10\delta x, \eta = 10\delta y,$$

где $\delta x, \delta y$ - поправки в координаты пункта, выраженные в метрах;

l_{ik} - свободный член уравнения поправок.

Коэффициенты a_{ik} и b_{ik} уравнений поправок и свободный член l_{ik} вычисляют по следующим формулам

$$\begin{aligned} a_{ik} &= -20.6265 \frac{\sin \alpha_{ik}^0}{S_{ik}}, \\ b_{ik} &= +20.6265 \frac{\cos \alpha_{ik}^0}{S_{ik}}, \quad (61) \\ l_{ik} &= z_{ik}^0 - z_i^0, \end{aligned}$$

где

$$z_0 = \frac{1}{n} \sum_1^n z_{ik}, \quad (62)$$

$$z_{ik} = \alpha_{ik}^0 - N'_{ik}, \quad (63)$$

где N'_{ik} - значение измеренного направления;

n - число измеренных направлений на пункте.

Для обратного направления уравнение поправок примет вид:

$$v_{ki} = -\delta z_0 - a_{ki} \xi_{ki} - b_{ki} \eta_k + a_{ki} \xi_i + b_{ki} \eta_i + l_{ki}, \quad (64)$$

В уравнениях поправок для прямого и обратного направлений знаки и величины коэффициентов при одноименных поправках будут попарно одинаковы, так как $a_{ik} = -a_{ki}$, $b_{ik} = -b_{ki}$. Контролем вычислений свободных членов на каждом

пункте является условие $\sum_1^n l_{ik} = 0$.

Если измерения выполнены с исходного пункта на исходный, уравнение поправок имеет вид

$$v_{ik} = -\delta z_i + l_{ik}. \quad (65)$$

Если измерения выполнены с определяемого пункта i на исходный k

$$v_{ik} = -\delta z_0 - a_{ik} \xi_i - b_{ik} \eta_i + l_{ik}, \quad (66)$$

Если i - исходный, k - определяемый пункты, то

$$v_{ik} = -\delta z_0 + a_{ik} \xi_k + b_{ik} \eta_k + l_{ik}. \quad (67)$$

Уравнение поправок дирекционных углов.

Уравнения поправок дирекционного угла имеет вид

$$v_{ik} - a_{ik} \xi_i - b_{ik} \eta_i + a_{ik} \xi_k + b_{ik} \eta_k + l_{ik}, \quad (68)$$

и отличается от уравнения поправок направлений отсутствием поправки в ориентирующий угол.

Коэффициенты a_{ik} и b_{ik} вычисляются по формулам, а свободный член $l_{ik} = \alpha_{ik}^0 - \alpha'_{ik}$, где α_{ik}^0 - вычисленное по приближенным координатам, а α'_{ik} - измеренное значение дирекционного угла.

Уравнение поправок измеренных сторон.

В геодезической сети трилатерации и полигонометрии измеряются стороны, в сетях триангуляции базисные стороны. Во все стороны, редуцированные на плоскость, определяют поправки из уравнивания.

Уравнение поправок, когда сторона измерена между определяемыми пунктами, имеет вид

$$v_{ik} = -c_{ik} \xi_i - d_{ik} \eta_i + c_{ik} \xi_k + d_{ik} \eta_k + l_{ik}. \quad (69)$$

c_{ik} и d_{ik} - коэффициенты уравнения поправок. Они вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}c_{ik} &= \frac{x_k^0 - x_i^0}{S_{ik}^0} = \cos \alpha_{ik}^0, \\d_{ik} &= \frac{y_k^0 - y_i^0}{S_{ik}^0} = \sin \alpha_{ik}^0.\end{aligned}\quad (70)$$

Свободный член уравнения поправок равен

$$l_{ik} = S_{ik}^0 - S'_{ik}. \quad (71)$$

В формулах S_{ik}^0 - длина стороны, вычисленная по приближенным координатам;

S'_{ik} - длина стороны, полученная из измерений и редуцированная на плоскость.

Вычислив коэффициенты уравнений поправок, составляют систему этих уравнений. От них переходят к нормальным уравнениям, из решения которых получают неизвестные ξ и η , позволяющие вычислить поправки в измеренные величины в сети.

Высокоточное нивелирование

Назначение и схема построения государственной нивелирной сети

Нивелирные сети подразделяются на государственные и ведомственные (маркшейдерские, на строительных площадках и т.п.).

Под государственной нивелирной сетью понимают систему размещенных на всей территории страны надежно закрепленных на местности геодезических пунктов (реперов), высоты которых определены в единой системе от одного исходного пункта, принимаемого за начало счета высот. За начало счета высот в нивелирной сети Республики Казахстан и стран СНГ принят средний уровень Балтийского моря.

Современная государственная нивелирная сеть строится методом геометрического нивелирования и подразделяется по точности на 4 класса: I, II, III, IV.

Нивелирная сеть I класса является главной высотной основой страны, обеспечивает распространение единой системы высот на всю ее территорию и решение научных задач. Она состоит из совокупности полигонов и отдельных линий, покрывающих страну и связывающих между собой фьорды морей и океанов, омывающих ее территорию.

Линии нивелирования I класса проложены преимущественно по железным, шоссейным и улучшенным дорогам, а также вдоль берегов крупных рек и морей. Она создается с наивысшей точностью при использовании наиболее точной измерительной техники и наиболее современных методов высокоточного нивелирования с одновременным выполнением гравиметрической съемки.

Нивелирная сеть II класса является сгущением высокоточной нивелирной сети I класса. На основе нивелирной сети II класса создаются нивелирные сети III, а затем IV класса. В особую группу можно выделить нивелирные сети высокой точности, создаваемые на геодинамических полигонах.

Высотная опорная сеть строится для решения научных и научно-технических задач. К основным научным задачам относятся следующие: изучение современных вертикальных движений земной поверхности; установление связи между уровнями различных морей и океанов и характера их изменений во времени. К научно-техническим задачам относятся: создание единой системы высот и выбор исходной уровенной поверхности; развитие точной высотной основы топографических съемок всех масштабов и геодезического обоснования объектов строительства, разведки и разработки полезных ископаемых и т.д.; разработка высокоточных приборов, методов измерений и математической обработки полученных результатов.

Закрепление нивелирных линий.

Нивелирные линии всех классов закрепляются на местности реперами и марками. Тип репера выбирается в зависимости от физико-географических условий. Поэтому для каждой конкретной зоны разработаны особые конструкции реперов, обеспечивающие их стабильность по высоте и сохранность в течение длительного времени.

Благоприятными местами для закладки реперов являются повышенные формы рельефа с крупнозернистыми, слабоувлажненными грунтами, скальные

грунты. Стенные реперы необходимо стремиться закладывать в стены прочных зданий, построенных не менее 7-8 лет назад, на высоте 0.4-0.6 м от поверхности земли.

По надежности закрепления в грунте реперы подразделяются на: рядовые, закладываемые на линиях нивелирования всех классов через 5-7 км и фундаментальные, устанавливаемые через 50-60 км и в узлах линий I и II класса.

Глубина закладки фундаментального репера должна быть такой, чтобы его основание располагалось на 1 м ниже границы наибольшего промерзания грунтов, но не менее чем на 2.5 м от поверхности земли; для грунтового репера данные величины равны 50 см и 1.3 м соответственно.

В верхние плоскости пилона и плиты заделаны марки. В 1.5 м от репера устанавливают железобетонный опознавательный столб с охранной плитой, а вокруг репера выкапывают опознавательную канаву. При наличии скальной породы закладывают реперы для скальных пород.

По конструкции и местам закладки нивелирные реперы подразделяются на: грунтовые, скальные и стенные.

Высокоточные нивелиры и инварные рейки

Высокоточные нивелиры предназначены для определения превышения с наивысшей точностью: случайная средняя квадратическая ошибка на 1 км двойного хода составляет 0.3-0.5 мм, систематическая –0.03-0.05 мм.

Высокоточные нивелиры это: нивелиры с уровнем при трубе, нивелиры с компенсаторами угла наклона трубы, автоматизированные нивелиры с увеличением зрительной трубы не менее 25[×], термостатированные.

Нивелиры Н-05 предназначены для нивелирования I и II классов в государственной геодезической сети, на геодинимических полигонах, при инженерно-геодезических работах высокой точности. При наличии компенсатора шифр нивелира дополняется буквой К, например Н-05К.

Компенсаторы или стабилизаторы – это специальные устройства, позволяющие автоматизировать установку в горизонтальное положение линии визирования. Они заменяют собой цилиндрические уровни.

При нивелировании I и II классов широко использовался высокоточный нивелир Ni 004 «Карл Цейс Йена», нивелир Ni 002 с компенсатором и другие.

Нивелиры пока в большинстве своем остаются оптико-механическими приборами. Все они имеют компенсирующие устройства и высокоточные плоскопараллельные микрометры. В 1990 г. фирмой «Wild» Швейцария был выпущен первый автоматизированный цифровой (электронный) нивелир NA– 2000. Дальнейшей его разработкой явилась модель NA– 3000. В приборе осуществляется автоматическая электронная обработка изображений реек с определением расстояний и высот точек, на которых они установлены, выдача измерительных данных на дисплей и накопление их в запоминающем устройстве. Продолжительность электронных измерений ускоряется почти вдвое по сравнению с технологией визуального отсчитывания реек. Точность электронного нивелирования с кодовой рейкой 0.4 мм/км. Рабочей мерой являются двухсторонние и одно-сторонние инварные штрих-кодовые рейки.

Внедрение нового класса электронных нивелиров приведет к повышению культуры производства, сокращению бригады нивелировщиков, повышению объективности измерений, росту производительности труда.

Рабочей мерой к высокоточным нивелирам служат трехметровые односторонние штриховые рейки с инварной лентой (тип РН-05). По краям ленты нанесены две шкалы – основная, оцифрованная от 0 до 60 и дополнительная – от 60 до 119 полудециметров. Штрихи нанесены через 0.5 см и подписаны через каждый полудециметр. Корпусом рейки служит деревянный корпус с пазом для инварной полосы.

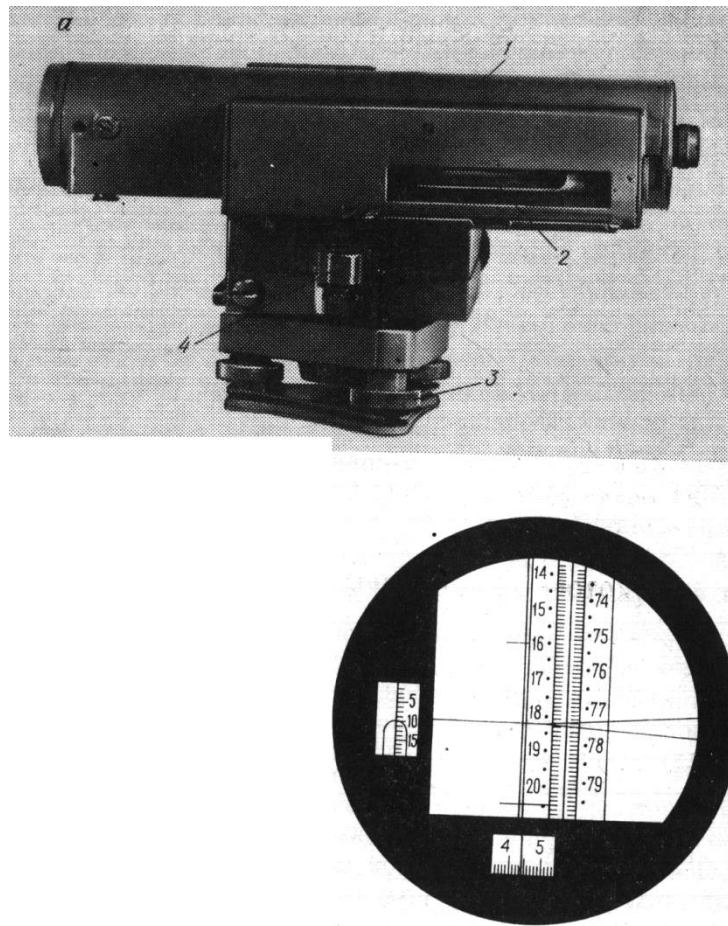


Рис.16 – Нивелир Н-05 и инварная рейка

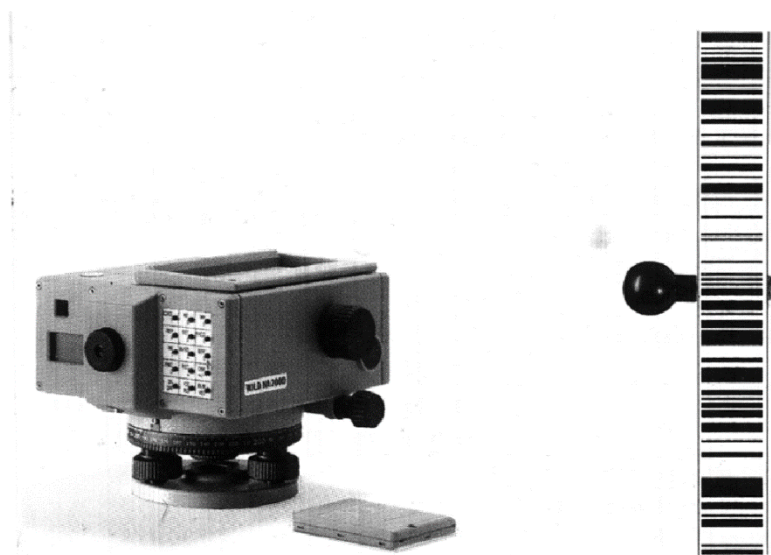


Рис. 17– Нивелир NA– 3000 и штрих-кодовая рейка

Перед началом и после окончания полевых работ инварные рейки эталонируют на компараторе, в результате чего определяют длины метровых интервалов основной и дополнительной шкал.

В период полевых работ для проверки неизменности длины метровых интервалов их измеряют повторно через каждые два месяца контрольной линейкой.

Способы высокоточного нивелирования

Нивелирование I и II классов производится из середины способом совмещения.

Нивелирование I класса выполняется прямым и обратным ходами по двум парам костылей, образующих две отдельные линии нивелирования – правую и левую, которые прокладываются параллельно на расстоянии не менее 0.5 м друг от друга. Минимальная высота визирного луча – 0.8 м, максимальная длина визирного луча 50 м, неравенство расстояний от нивелира до реек на станции 0.5 м, по секции –1.0 м. Нивелирование II класса прокладывают по одной паре костылей прямым и обратным ходами. Минимальная высота визирного луча – 0.5 м, неравенство расстояний от нивелира до реек на станции 1.0 м, по секции –2.0 м, максимальная длина визирного луча 65 м. Расхождение превышений в прямом и обратном ходе; предельная невязка в мм для I класса $-3\text{мм}\sqrt{L}$; для II класса $5\text{мм}\sqrt{L}$.

Прямой и обратный ходы при нивелировании I и II классов прокладывают в разные половины дня, по одной и той же трассе, по переходным точкам одного и того же типа. Число штативов в прямом и обратном ходах должно быть равным и четным.

Нивелирование I и II классов выполняют участками по 25-30 км по схеме «восьмерки».

При нивелировании II класса в прямом ходе порядок наблюдений на станции следующий:

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

В обратном ходе наблюдения на нечетных станциях начинают с передней рейки, а на четных с задней. В обратном ходе рейки меняют местами. При нивелировании I класса наблюдения начинают с правых костылей.

Нивелирные сети III и VI классов создаются с целью сгущения высотного обоснования для топографических съемок и разного рода маркшейдерско-геодезических работ. Плотность пунктов нивелирной сети зависит от стадии освоения месторождения, масштаба съемки и высоты сечения рельефа. Основные характеристики и допуски нивелирования III и VI классов приведены в таблице

Таблица 5 - Основные характеристики и допуски нивелирования III и VI классов

Показатели	Нивелирование	
	III класса	VI класса
Периметр полигонов, км	60	25
Длина хода между узловыми точками, км	20	8
Увеличение трубы нивелира	30 ^x -35 ^x	25 ^x -30 ^x
Длина визирного луча, м	75-100	100-150
Высота визирного луча над поверхностью земли, м	0,3	0,2
Неравенство расстояний на станции (м), не более	2	5
Неравенство расстояний в секции (м), не более	5	10
Разность превышений на станции (мм)	3	5
Предельная невязка в ходе (мм)	$10_{мм}\sqrt{L}$	$20_{мм}\sqrt{L}$

Нивелирование III класса производится в прямом и обратном ходах способом совмещения или способом отсчетов по трем нитям по основной шкале реек и по средней нити – по дополнительной шкале реек. Отсчеты по дальномерным нитям берутся для определения расстояний и для контроля превышений.

Нивелирование VI класса выполняется в прямом ходе, отсчеты по рейкам берутся по средней и одной из крайних нитей по основной шкале и по средней нити – по дополнительной шкале реек.

Оценка точности результатов геометрического нивелирования, когда ходы образуют замкнутые полигоны, определяется средней квадратической случайной погрешностью $\eta_{км}$ на 1 км хода, выражаемой формулой

$$\eta_{км}^2 = \frac{1}{N} \left[\frac{f^2}{L} \right], \quad (72)$$

где L - периметр полигона, км; N - число полигонов; f - невязка полигона, мм.

Если нивелирная сеть состоит из m секций длиной $r_{км}$ с k узловыми точками, то погрешность $\eta_{км}$ вычисляется по формуле

$$\eta_{км}^2 = \frac{1}{n-k} \left[\frac{v^2}{r} \right], \quad (73)$$

где v - поправка в среднее превышение между узловыми точками.

В настоящее время имеются все возможности для обработки и уравнивания нивелирования на ЭВМ, например, в программе CREDO.

Новые тенденции в развитии методов нивелирования. В настоящее время успешно применяются методы GPS/ГЛОНАСС – измерений для получения высот геодезических пунктов. Спутниковое нивелирование (спутниковая альтиметрия) становится самым мощным способом определения высот геоида.

В последние годы при нивелировании различных классов начали применяться цифровые (электронные) нивелиры со штрих-кодowymi рейками. В связи с этим кардинально меняется технология нивелирных работ, начиная с проектирования и заканчивая математической обработкой результатов измерений с оценкой точности. В практику геодезических работ начали широко внедряться электронные тахеометры, которые по техническим характеристикам пригодны для выполнения государственного нивелирования. Спутниковые технологии также позволяют обеспечить точность измерений на уровне требований отдельных классов государственного нивелирования.

Технические параметры и особенности цифровых нивелиров принципиально отличаются от существующих нивелиров с оптическими микрометрами. Кроме этого в ряде случаев с помощью цифровых нивелиров не представляется возможным выполнить измерение превышения на станции вследствие:

Отсутствия видимости на рейку; влияния вибрации от работающего оборудования или движения транспорта; невозможности подзарядки аккумуляторов; влияния конвекционных и турбулентных потоков воздуха; попадания тени на рейку; яркой освещенности рейки или резкого ее изменения; загрязнения кодовой стороны рейки.

Цифровые нивелиры могут иметь различные варианты комплектации (рисунки)

Разработка и совершенствование технологии государственного нивелирования

Нивелиры пока в большинстве своем остаются оптико-механическими приборами. Все они имеют компенсирующие устройства и высокоточные плоскопараллельные микрометры. В 1990 г. фирмой «Wild» Швейцария был выпущен первый автоматизированный цифровой (электронный) нивелир NA– 2000. Дальнейшей его разработкой явилась модель NA– 3000. В приборе осуществляется автоматическая электронная обработка изображений реек с определением рас-

стояний и высот точек, на которых они установлены, выдача измерительных данных на дисплей и накопление их в запоминающем устройстве. Продолжительность электронных измерений ускоряется почти вдвое по сравнению с технологией визуального отсчитывания реек. Точность электронного нивелирования с кодовой рейкой 0.4 мм/км. Рабочей мерой являются двухсторонние и одно-сторонние инварные штрих-кодовые рейки.

Внедрение нового класса электронных нивелиров приведет к повышению культуры производства, сокращению бригады нивелировщиков, повышению объективности измерений, росту производительности труда.

При нивелировании II класса цифровыми нивелирами могут быть применены три программы наблюдений на станции (таблица 6). Общим для всех программ является сохранение технологической схемы проложения нивелирного хода в прямом и обратном направлениях.

Таблица 6 - Программы наблюдений на станции при нивелировании II класса цифровыми нивелирами

Класс нивелирования	S_{\max} , м	Программа работы на станции	Число линий (горизонтов) прибора	Число ходов	Число превышений	ΔS , м	$\Sigma \Delta S$, м
II	60	A (2к)	1	2	4	2.0	2.0
		B(1к+1ш)			4		
		C(1к+1к)			4		
		D(1к)			2		

Таблица 7 - Последовательность наблюдений на станции

Программа наблюдений	Станция	Последовательность наблюдений	
		Прямой ход	Обратный ход
A (2к)	Нечетная	Z_k, P_k, P_k^0, Z_k^0	P_k, Z_k, Z_k^0, P_k^0
	Четная	P_k, Z_k, Z_k^0, P_k^0	Z_k, P_k, P_k^0, Z_k^0
B(1к+1ш)	Нечетная	$Z_k, P_k, P_{ш}, Z_{ш}$	$P_k, Z_k, Z_{ш}, P_{ш}$
	Четная	$P_k, Z_k, Z_{ш}, P_{ш}$	$Z_k, P_k, P_{ш}, Z_{ш}$
C(1к+1к)	Нечетная	Z_k, P_k, P'_k, Z'_k	P_k, Z_k, Z'_k, P'_k
	Четная	P_k, Z_k, Z'_k, P'_k	Z_k, P_k, P'_k, Z'_k
D(1к)	Нечетная	Z_k, P_k	P_k, Z_k
	Четная	P_k, Z_k	Z_k, P_k

Программа А и В наблюдений на станции предусматривает применение двухсторонних штрих-кодовых реек или комбинированных (штрих-кодовая и штриховая сторона).

Программа С наблюдения на станции применяется при наличии реек только с одной штрих-кодовой стороной, измерения выполняются при двух горизонтах инструмента.

Программа D применяется при наличии реек с одной штрих-кодовой стороной, нивелирование на станции выполняется при двух горизонтах прибора. В этом случае на станции будет измеряться только одно превышение, и, следовательно данную программу можно применять только при небольшой длине линии.

Тригонометрическое нивелирование. Тригонометрическим нивелированием называют метод определения разности высот точек местности наклонным визирным лучом, для чего с одной точки на другую измеряют углы наклона или зенитные расстояния и дальности (последние могут быть получены из вычислений).

Тригонометрическое нивелирование производят с целью определения высот пунктов в труднодоступных районах, где применение геометрического нивелирования осложнено или невозможно.

В зависимости от измеряемых элементов тригонометрическое нивелирование делится на одностороннее – в случае измерения зенитных расстояний на одном конце нивелируемой линии и двустороннее – когда зенитные расстояния определяются на обоих конечных пунктах.

Формула одностороннего тригонометрического высокоточного нивелирования имеет вид

$$h = s \cdot \operatorname{ctg} Z' + \frac{1-k}{2R} s^2 + i - l, \quad (74)$$

где h - превышение между двумя точками на поверхности Земли; Z' - измеренное зенитное расстояние; s - расстояние между пунктами; k - коэффициент рефракции; R - радиус Земли; i - высота прибора; l - высота знака.

Формула двустороннего тригонометрического высокоточного нивелирования между пунктами А и В земной поверхности имеет вид:

$$h = s \cdot \operatorname{tg} \frac{Z_B - Z_A}{2} + \frac{k_B - k_A}{4R} s^2 + \frac{i_A + l_A}{2} - \frac{i_B + l_B}{2}. \quad (75)$$

Сфероидическая геодезия. Основные параметры земного эллипсоида. Системы координат

В сфероидической геодезии изучаются прежде всего методы определения взаимного положения точек, расположенных на поверхности земного эллипсоида, способы решения геодезических задач на этой поверхности.

Кроме того в сфероидической геодезии изучаются методы определения взаимного положения точек, расположенных над поверхностью эллипсоида: или в околоземном пространстве. В этом случае используют систему пространственных координат X, Y, Z или систему пространственных геодезических координат B, L, H .

Наряду с системой геодезических координат в сфероидической геодезии изучается система плоских координат, для установления которой применяют то или иное картографическое изображение поверхности эллипсоида на плоскости. Переход к системе плоских координат существенно облегчает использование геодезических пунктов при создании топографических карт и при решении многих практических задач на небольших участках земной поверхности.

В связи с этим в сфероидической геодезии изучается геометрия земного эллипсоида и способы отображения его поверхности и элементов на сфере и на плоскости.

Таким образом, в сфероидической геодезии изучают геометрические методы определения взаимного положения точек земной поверхности и околоземного пространства, в которых в качестве исходной координатной поверхности принята поверхность земного эллипсоида, а используемые в этих методах измеренные величины свободны от влияния уклонения отвеса.

Основные параметры земного эллипсоида

При решении задач сфероидической геодезии в качестве поверхности относимости используется эллипсоид вращения (две оси равны), который образуется в результате вращения эллипса вокруг его малой оси. Он задается двумя параметрами – длинами двух различных полуосей a, b или (более распространенный случай) длиной большой полуоси a и коэффициентом сжатия α .

Рассмотрим эллипсоид вращения с центром в т. O , осью вращения PP_1 , плоскостью экватора $OEAE_1$.

Введем обозначения:

a – экваториальная или большая полуось эллипсоида

$$a = OE = OE_1 = OA.$$

b – полярная или малая полуось эллипсоида

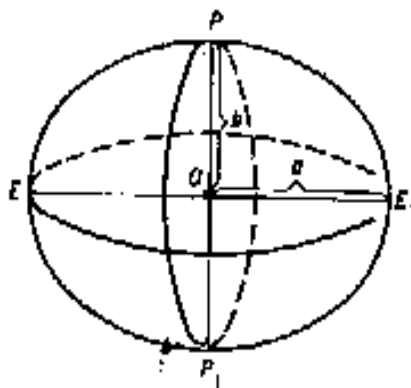


Рис. 19 – Параметры эллипсоида вращения

$$b = OP = OP_1$$

α - полярное сжатие эллипсоида

$$\alpha = \frac{a-b}{a}. \quad (76)$$

Расстояние от центра эллипса до каждого из фокусов F_1 и F_2 , равно $\sqrt{a^2 - b^2}$, называется линейным эксцентриситетом, а отношение линейного эксцентриситета к большой или малой полуосям – эксцентриситетами эллипса.

e – первый эксцентриситет меридианного эллипса

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}. \quad (77)$$

e' - второй эксцентриситет меридианного эллипса

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}. \quad (78)$$

Параметры a , b , α - являются основными, определяющими эллипсоид вращения, остальные вспомогательные, применяемые в вычислениях и теоретических выводах.

Линейные элементы – большая и малая полуоси – определяют размеры эллипсоида, а эксцентриситет – его форму, т.е. приплюснутость у полюсов.

Для эллипсоида Красовского приняты следующие значения его элементов:

$$a = 6\,378\,245.0 \text{ м}$$

$$b = 6\,356\,863.019 \text{ м}$$

$$\alpha = 0.00335233$$

$$e = 0.00669342$$

$$e' = 0.00673852$$

Для эллипсоида ПЗ –90 приняты: $a = 6378136.0$ м; $\alpha = 1: 298,257839$

Прямоугольные координаты Гаусса-Крюгера. Основные соображения по выбору и применению системы плоских прямоугольных координат. Основные формулы проекции Гаусса-Крюгера

Конечной целью всех видов геодезических измерений является определение взаимного положения точек земной поверхности и околоземного пространства в той или иной системе координат. К достижению этой цели направлены усилия науки и производства в области геодезии.

Наряду с системой геодезических координат в сфероидической геодезии изучается система плоских координат, для установления которой применяют то или иное картографическое изображение (картографическая проекция) поверхности эллипсоида на плоскости. Переход к системе плоских координат, существенно облегчает использование геодезических пунктов при создании топографических карт и при решении многих практических задач на небольших участках земной поверхности.

В геодезических работах стран СНГ и Республики Казахстан используется зональная, конформная (равноугольная), поперечно-цилиндрическая проекция Гаусса-Крюгера. Она была разработана Гауссом в 1825-1830 гг. и получила практическое распространение после вывода Крюгером в 1912 г. рабочих формул, удобных для вычислений в этой проекции.

Основные особенности проекции Гаусса –Крюгера:

- проекция равноугольная, в ней сохраняется равенство углов, т. е. сохраняется форма и подобие изображаемых фигур в их бесконечно малых частях;
- линейные искажения в каждой данной точке одинаковы по всем направлениям, т.е масштаб изображения не зависит от азимута линии, а только от координат данной точки;
- осевой меридиан и экватор изображаются на плоскости прямыми линиями;
- масштаб изображения вдоль осевого меридиана равен единице, т.е. отрезки осевого меридиана изображаются без искажений. При удалении от осевого меридиана искажения возрастают.

В проекции Гаусса-Крюгера земной эллипсоид делится на сферические двугрульники, называемые зонами. В зависимости от масштаба создаваемой карты или плана могут использоваться:

- шестиградусные зоны (М 1:100 000 и мельче);
- трехградусные зоны (М 1: 1000 –1: 5000);
- полутороградусные зоны (М 1: 500 и крупнее);
- местные зоны для обработки локальных инженерно-геодезических сетей.

Изображение каждой зоны на плоскости совершенно одинаковы, что определяет однообразие плоских координат в них и применение одних и тех же формул при вычислениях в разных зонах и при переходе из зоны в зону.

Прямоугольные координаты x, y в пределах зоны вычисляются относительно экватора и осевого меридиана, которые изображаются прямыми линиями (рис.20)

Осевой меридиан принимается за ось x , ось y совпадает с изображением линии экватора.

В пределах Республики Казахстан и СНГ абсциссы положительные; ординаты положительные к востоку, отрицательные к западу от осевого меридиана. Чтобы избежать отрицательных значений ординат, точкам осевого меридиана

условно приписывается значение $y = 500\,000$ м с обязательным указанием впереди номера соответствующей зоны.

Осевые меридианы шестиградусных зон совпадают с центральными меридианами листов карты масштаба 1: 1 000 000.

Общий порядок перехода от эллипсоида на плоскость рассмотрим на примере редуцирования треугольника триангуляции.

Все линии на поверхности земного эллипсоида, за исключением осевого меридиана и экватора, изображаются кривыми. Стороны треугольника с вершинами 1,2,3, построенного на эллипсоиде (рис. 20а), изобразятся на плоскости в виде кривых (рис.20 б).

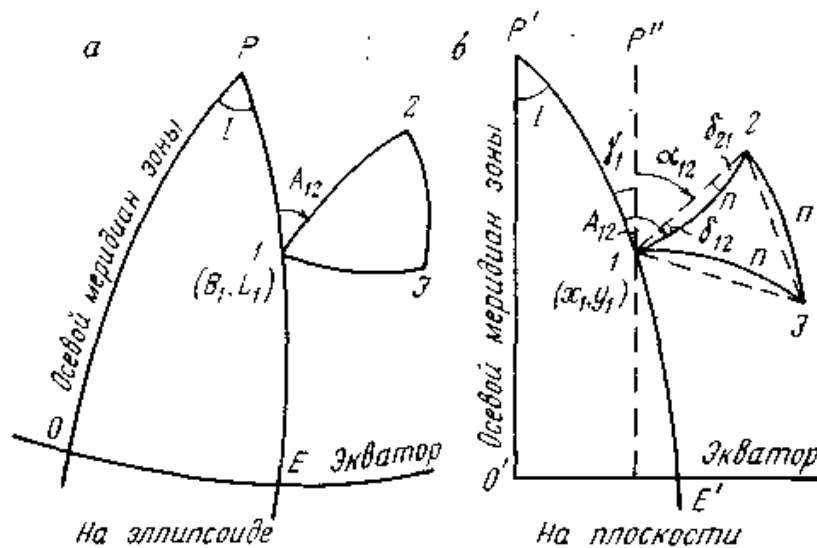


Рис. 20- Изображение треугольника триангуляции: а) на поверхности земного эллипсоида, б) на плоскости

Введем следующие обозначения: OP - осевой меридиан зоны, долгота которого равна L_0 ; $E1P$ - геодезический меридиан точки 1, имеющей геодезические координаты B_1, L_1 ; $l = L_1 - L_0$ - долгота точки 1 относительно осевого меридиана; A_{12} - геодезический азимут направления 1–2.

Конформное изображение тех же линий и треугольника показано на рис.

$O'P'$ - осевой меридиан зоны; $E'1P'$ - геодезический меридиан точки 1, имеющей плоские прямоугольные координаты x_1, y_1 ; α_{12} - дирекционный угол хорды s_{12} , стягивающей концы изображения стороны треугольника между точками 1 и 2; $P''1$ - линия, проходящая через точку 1 параллельно осевому меридиану зоны; γ_1 - гауссово сближение меридианов в точке 1.

Сфероидический треугольник изобразится на плоскости криволинейным треугольником со сторонами, вогнутость которых обращена в сторону оси абсцисс. Для решения такого треугольника не возможно применить простые формулы аналитической геометрии. Поэтому, криволинейный треугольник превращают в прямолинейный, соединяя концы дуг хордами. Для этого в каждое

направление вводят поправки δ_{ik} - поправки за кривизну изображения геодезической линии на плоскости или редукции горизонтальных направлений.

Кроме того, надо иметь формулы, позволяющие вычислить плоские координаты x, y исходного пункта 1 по его геодезическим координатам $B_1 L_1$.

Для вычисления координат x, y других вершин треугольника надо определить дирекционные углы α_{ik} и длины сторон s_{ik} на плоскости. Для вычисления дирекционного угла α_{12} исходной стороны надо знать гауссово сближение меридианов γ_1 и δ_{12} . Дирекционный угол можно вычислить по формуле

$$\alpha_{ik} = A_{ik} - \gamma_i + \delta_{ik}. \quad (79)$$

Порядок обработки триангуляции в проекции Гаусса-Крюгера следующий:

- 1) по геодезическим координатам $B_1 L_1$ начального пункта вычисляют плоские прямоугольные координаты его проекции и сближение меридианов»
- 2) определяют приближенно дирекционный угол исходной стороны

$$\alpha_{ik} = A_{ik} - \gamma_i. \quad (80)$$

3) выполняют предварительное решение треугольников по исходной стороне и измеренным углам, а также вычисляют приближенные координаты вершин треугольника или определяют их графически с точностью 0.1 км;

4) вычисляют приближенное значение поправок Δs в исходную сторону и δ_{ik} - в каждое измеренное направление по формулам

$$\begin{aligned} \Delta s &= 0.123 y_m^2 S; \\ \delta_{ik} &= 0.00253 y_m \Delta x, \end{aligned} \quad (81)$$

где $y_m = (y_i + y_k) / 2$; $\Delta x = x_k - x_i$;

5) повторно вычисляют дирекционный угол по формуле () и определяют координаты пунктов, после чего окончательно вычисляют поправки в длину исходной стороны и измеренные направления.

Основные формулы проекции Гаусса-Крюгера устанавливают взаимосвязь между геодезическими координатами B, L точки эллипсоида и прямоугольными координатами x, y проекции этой точки на плоскость в проекции Гаусса-Крюгера.

Задача заключается в определении функций f_1 и f_2 из уравнений

$$\begin{aligned} x &= f_1(B, L) \\ y &= f_2(B, L) \end{aligned} \quad (82)$$

исходя из условий проекции Гаусса-Крюгера:

- 1) осевой меридиан изображается на плоскости прямой линией, принимаемой за ось x , поэтому при $l = 0$ и $y = 0$;

2) для всех точек осевого меридиана абсцисса x равна дуге меридиана X от экватора до точки с заданной широтой, поэтому

$$x = f_1(l=0) = X. \quad (83)$$

Рабочие формулы для перехода от геодезических координат B, L к прямоугольным координатам x, y могут быть получены после установления вида функций f_1 и преобразованы для вычислений с использованием тех или иных вычислительных средств.

Основные уравнения, определяющие закон изображения точек эллипсоида на плоскости в проекции Гаусса-Крюгера имеют вид

$$\begin{aligned} x &= X - \frac{l^2}{2} \frac{d^2 X}{dq^2} + \frac{l^4}{24} \frac{d^4 X}{dq^4} - \frac{l^6}{720} \frac{d^6 X}{dq^6} \dots; \\ y &= l \frac{dx}{dq} - \frac{l^3}{6} \frac{d^3 X}{dq^3} + \frac{l^5}{120} \frac{d^5 X}{dq^5} \dots \quad (84) \end{aligned}$$

Установление параметров связи координатных систем различных эллипсоидов. Местные системы координат.

Ориентирование референц-эллипсоида. Исходные геодезические даты.

Для задания системы государственных геодезических координат в качестве поверхности относимости используется референц-эллипсоид. В качестве координат на такой поверхности используются криволинейные координаты, известные как широта и долгота. Хотя начало координат определяется как точка пересечения экватора и Гринвичского меридиана, в действительности для задания отсчета координат используется косвенный метод, когда для некоторой точки на поверхности Земли (так называемого начального пункта) фиксируются значения широты и долготы, производится совмещение нормали к поверхности референц-эллипсоида и отвесной линии в данной точке, а плоскость меридиана исходного пункта устанавливается параллельно оси вращения Земли. Эти исходные данные, называемые также геодезическими датами, жестко фиксируют систему геодезических координат относительно тела Земли. Для эллипсоида Красовского такая точка задана в Пулковом (центр круглого зала обсерватории), и этим задается система координат 1942 г. (СК-42). В СК-42 используется Балтийская система высот, где отсчет ведется от поверхности квазигеоида, и $Z = 0$ соответствует нулевой отметке кронштадского футштока (средний уровень Балтийского моря).

При создании геодезических сетей или их модернизации используются новейшие спутниковые технологии. При этом возникает задача совместной обработки и объединения наземных и спутниковых сетей. Наземные сети обрабатываются в ПК на поверхности эллипсоида Красовского. Новая измерительная техника проще всего связывается с системой обезданного эллипсоида WGS –84 (World Geodetic System 1984). Отсюда возникает задача перехода от системы координат одного эллипсоида к системе координат другого эллипсоида.

От эллипсоидальных координат легко перейти к трехмерной прямоугольной системе координат с началом отсчета в центре эллипсоида (геоцентрическая система координат). Преобразование геодезических координат B, L, H в пространственную систему координат, связанную с референц-эллипсоидом можно выполнять по формулам

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cdot \cos L; \\ Y &= (N + H) \cos B \cdot \sin L; \quad (85) \\ Z &= [N \cdot (1 - e^2)] \sin B, \end{aligned}$$

где $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$ - радиус кривизны первого вертикала; a - большая полуось эллипсоида; e - первый эксцентриситет меридианного эллипса.

Переход от одного эллипсоида к другому будет определяться связью геоцентрических координат этих эллипсоидов. В общем случае такая связь может быть выражена семью параметрами связи – сдвигами начал координат вдоль каждой оси (три линейных параметра), поворотами вокруг каждой оси (три угло-

вых параметра) и одним масштабным коэффициентом. В целом эти преобразования осуществляются по формулам Хельмерта (Гельмерта).

$$\begin{aligned} X_{\text{общ.зем.}} &= X + X\Delta m + \varepsilon_z Y - \varepsilon_y Z + x; \\ Y_{\text{общ.зем.}} &= Y + Y\Delta m + \varepsilon_x Z - \varepsilon_z X + y; \quad (86) \\ Z_{\text{общ.зем.}} &= Z + Z\Delta m + \varepsilon_y X - \varepsilon_x Y + z, \end{aligned}$$

где X, Y, Z - координаты в системе референц-эллипсоида; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ - малые углы поворота (в радианной мере) вокруг осей референцной системы координат, соответствующих индексам, при переходе к общеземной системе. Эти углы являются абсолютными угловыми элементами ориентирования референцной системы координат и часто называются эйлеровыми углами. Элементы $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ характеризуют отличие направления полярной оси референцной системы от общеземной. Третий элемент характеризует отдаленность начала счета долгот в референцной и общеземной системах. Δm - масштабная поправка за переход от референцной системы к общеземной.

Общие сведения о выборе системы координат при обработке локальных геодезических сетей. Местные системы координат.

В ряде случаев может оказаться более удобным использование местной системы координат и локальной поверхности относимости. В качестве поверхности относимости удобнее использовать не референц-эллипсоид, а плоскость или сферу определенного радиуса, равного среднему радиусу кривизны референц-эллипсоида в пределах сети. Результаты всех измерений редуцируют к поверхности этой сферы. В качестве исходного выбирают любой пункт сети, приближенные координаты которого известны.

Для целей уравнивания сетей сгущения в местной системе координат следует все координаты исходных пунктов ГГС преобразовать в местную систему координат с учетом отнесения их к поверхности относимости города или ПГТ.

Для преобразования координат пунктов из системы 1942 г. в местную и обратно должны быть известны следующие параметры:

- значение координат начального пункта в системе 1942 г. X_0, Y_0 ;
- значение координат начального пункта в местной системе координат x_0, y_0 ;
- угол поворота γ местной системы относительно системы 1942 г. в начальном пункте;
- масштаб m местной системы координат относительно 1942 г.;
- значение поверхности относимости (H_0), к которой отнесены измерения: обычно это или уровень моря $H_0 = 0$ или средний уровень города $H_0 = H_{\text{ср.}}$;
- долгота осевого меридиана местной системы L_0 ;
- принятый для местной системы референц-эллипсоид;
- принятая система высот: либо Балтийская, либо местная, а также формулы преобразования из системы в систему.

Вычисление угла поворота местной системы координат. Значение угла поворота обычно задается и означает угол поворота местного осевого меридиана, отсчитываемый по ходу часовой стрелки от осевого меридиана 6° зоны Гаусса-Крюгера.

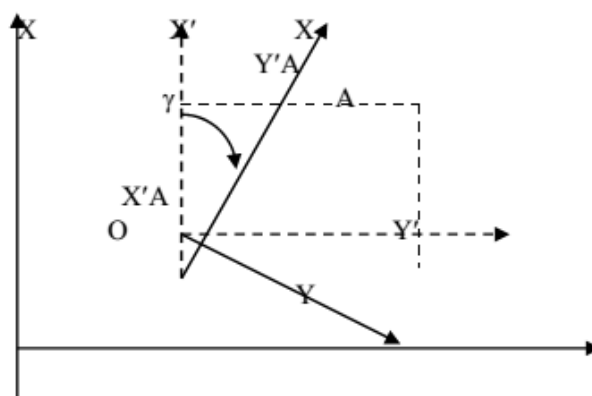


Рис. 21 – Параметры перехода от местной системы к системе СК 42

При отсутствии некоторых из перечисленных или всех параметров местной системы их определяют косвенным путем по результатам сравнения нового уравнивания сети в системе 1942 г. и прежнего уравнивания старой сети в местной системе координат.

Если угол поворота γ не задается, его определяют как разность дирекционных углов стороны в системе 1942 г. и в местной системе координат

$$\gamma_i = (\alpha_{ki} - \delta_{ki})_{42} - (\alpha_{ki} - \delta_{ki})_{мск}, \quad (87)$$

где α_{ki} - дирекционный угол стороны ki в системе 1942 г.;

α'_{ki} - дирекционный угол стороны ki в местной системе;

$\delta_{ki}, \delta'_{ki}$ - поправки за кривизну изображения геодезической линии в системе 1942 г. и местной системе координат.

Отсутствующие данные о значении координат начального пункта в системе 1942 г. X_0, Y_0 получают после уравнивания геодезической сети в системе 1942 г.

Определение масштаба местной системы координат.

Если масштаб местной системы координат не задан, его определяют косвенно по формуле

$$m_i = \frac{(S'_{ki})_{мск}}{(S_{ki})_{42}}. \quad (88)$$

где $(S'_{ki})_{мск}, (S_{ki})_{42}$ - длины сторон, вычисленные по координатам совмещенных пунктов местной и системе 1942 г.

Для определения γ и m используют одни и те же стороны, вычисленные по координатам совмещенных пунктов, равномерно расположенным на территории города (поселка) на расстоянии между ними не менее 2 км.

γ и m вычисляются с точностью $0.1''$ и по координатам с точностью 0.001 м. За окончательное значение принимается среднее арифметическое из всех γ и m . Разброс значений γ не должен превышать $1''-2''$, а m не больше чем 1-2 единицы пятого знака после запятой.

Формулы преобразования координат из системы в систему

В зависимости от площади города (поселка) и его удаления от осевого меридиана зоны, преобразование координат из системы 1942 г. в местную систему и обратно может быть выполнено по неполным и полным формулам.

Для сетей малых городов и ПГТ, опирающихся на исходные данные ГГС, у которых

$|Y_{\max}^{42}| - |Y_{\min}^{42}| \leq 40 \text{ км}, |Y_{\max}^{42}| \leq 35 \text{ км},$ можно пользоваться неполными формулами преобразования.

Преобразование координат из системы 1942 г. в местную по неполным формулам:

$$\begin{aligned} x_m &= \Delta X^{42} m \cos \gamma + \Delta Y^{42} m \sin \gamma + x_0, \\ y_m &= \Delta Y^{42} m \cos \gamma - \Delta X^{42} m \sin \gamma + y_0, \end{aligned} \quad (89)$$

где $\Delta X^{42} = X^{42} - X_0^{42}; \Delta Y^{42} = Y^{42} - Y_0^{42}$, где X_0^{42}, Y_0^{42} - координаты начального пункта в системе 1942 г.;

m - масштаб;

γ - угол поворота МСК;

x_0, y_0 - координаты начального пункта в местной системе координат.

Преобразование из местной системы координат в систему 1942 г. по неполным формулам

$$\begin{aligned} X_{42} &= X_0^{42} + \Delta x_m \frac{1}{m} \cos \gamma - \Delta y_m \frac{1}{m} \sin \gamma \\ Y_{42} &= Y_0^{42} + \Delta y_m \frac{1}{m} \cos \gamma + \Delta x_m \frac{1}{m} \sin \gamma, \end{aligned} \quad (90)$$

где $\Delta x_m = x_m - x_0;$
 $\Delta y_m = y_m - y_0$

Решение сфероидических треугольников и главных геодезических задач на поверхности эллипсоида

Главные нормальные сечения эллипсоида вращения и их радиусы кривизны

В каждой точке на поверхности эллипсоида можно восстановить нормаль. Через эту нормаль в разных направлениях можно провести бесчисленное множество плоскостей. Каждая нормальная плоскость пересечет поверхность эллипсоида по кривой линии, называемой нормальным сечением. Каждое нормальное сечение имеет свою кривизну. Из них можно выделить два нормальных сечения, одно из которых имеет наибольшую кривизну, а другое – наименьшую кривизну. Эти два сечения называются *главными нормальными сечениями*, а их радиусы кривизны – *главными радиусами кривизны*.

Главным нормальным сечением, имеющим минимальный радиус кривизны, является меридиональное сечение, проходящее через точку на поверхности эллипсоида и оба его полюса. Его радиус кривизны обозначается M .

Вторым главным нормальным сечением будет сечение, перпендикулярное к меридиану. Это сечение носит название - первый вертикал. Радиус кривизны первого вертикала обозначается N .

Радиусы кривизны меридиана и первого вертикала вычисляются по формулам:

$$M = \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 B)^3}}; \quad (91)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}}. \quad (92)$$

Во всех точках поверхности эллипсоида, кроме полюсов $N > M$.

На экваторе ($B = 0^\circ$) получим $M = a(1-e^2)$, $N = a$, тогда как на полюсе ($B = 90^\circ$) будет $M = N = c$. В полюсах все нормальные сечения представляют собой меридианы. В связи с этим c называют полярным радиусом кривизны.

$$c = \frac{a}{\sqrt{1-e^2}}. \quad (93)$$

При решении практических задач геодезии, картографии и топографии, а также в инженерных задачах используют средний радиус кривизны R , равный среднему геометрическому из главных радиусов кривизны в данной точке.

$$R = \sqrt{MN}. \quad (94)$$

Главные радиусы кривизны M и N являются основными элементами сфероидической геодезии, т.е. без них невозможно вычисление элементов эллипсоида. По M вычисляют длины дуг меридианов, по N - длины дуг параллелей, разности долгот, азимутов и сближение меридианов.

Вычисление длин дуг меридианов.

Длина дуги меридиана SM между точками с широтами B_1 и B_2 определяется из решения эллиптического интеграла вида

$$S_M = \int_{B_1}^{B_2} M dB, \quad (95)$$

где dB – приращение геодезической широты вдоль дуги;
 M – значение радиуса кривизны меридиана вдоль вычисляемой дуги.
 При длине дуги до 1000 км, вычисление SM выполняют по формуле

$$S_M = \frac{(B_2 - B_1)''}{\rho''} (M_1 + M_{cp.} + M_2), \quad (96)$$

где B_1 и B_2 – широты концов меридиана;
 M_1 , M_2 и $M_{cp.}$ – значения радиусов кривизны меридианов в точках с широтами B_1 , B_2 и $B_{cp.} = (B_1 + B_2)/2$.

Вычисление длин дуг параллелей

Длина дуги параллели есть длина части окружности, поэтому она получается как произведение радиуса данной параллели на разность долгот l крайних точек искомой дуги

$$r = N \cos B; \quad S_n = \frac{l''}{\rho''} N \cos B = \frac{l'' \cos B}{(2)}, \quad l'' = (L_2 - L_1)''. \quad (97)$$

Для контроля вычислений длину дуги параллели следует определять как разность длин дуг Y_2, Y_1 , отсчитываемых от меридиана с долготой $L_1 = 30^\circ$

$$S_n = Y_2 - Y_1; \quad (98)$$

или используя таблицы по формуле

$$S_n = b_1 l'', \quad (99)$$

где b_1 значение длины секундной дуги параллели. Выбирается из таблиц по значению широты B , увеличена в 10^{-4} раз, поэтому следует уменьшить в 10^{-4} раз.

Длина меридиана в 1° в метрической мере в средних широтах Казахстана приближенно равна 111 км, дуги в $1''$ – 31 м, параллели в $1''$ – 20 м.

Вычисление площадей съемочных трапеций и их размеров.

На поверхности земного эллипсоида лист карты или съемочная трапеция ограничиваются линиями меридианов и параллелей. Эти линии и являются сторонами трапеций, поэтому натуральные размеры сторон трапеций должны вычисляться по формулам длин дуг меридианов и параллелей.

Северная и южная рамки трапеции a_1 и a_2 и являются дугами параллелей с широтами B_1 и B_2 , а восточная и западная – дугами меридианов c , d - диагональ трапеции.

Для получения конкретных размеров трапеции необходимо упомянутые дуги разделить на знаменатель масштаба m и умножить на 100 для получения в сантиметрах.

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{100 N_1}{m \rho''} \text{Cos}B_1 l'' = \frac{100}{m} l'' \frac{\text{Cos}B_1}{(2)}; \\ a_2 &= \frac{100 N_2}{m \rho''} \text{Cos}B_2 l'' = \frac{100}{m} l'' \frac{\text{Cos}B_2}{(2)}; \quad (100) \\ c &= \frac{100 M_m}{m \rho''} (B_2 - B_1)'' = \frac{100 \Delta B''}{m (1)_m}; \\ d &= \sqrt{a_1 a_2 + c^2}. \end{aligned}$$

Формулы дают возможность определять размеры искомой съёмочной трапеции, если она изображается на плоскости без искажений.

Теоретически, если съёмочная трапеция крупного масштаба (например 1:10 000) располагается на краю 6-градусной зоны, то длины ее сторон искажаются в проекции Гаусса на величину, превышающую графическую точность.

Линейное искажение определяется формулой

$$m-1 = \frac{l^2}{2\rho^2} \text{Cos}^2 B_m. \quad (101)$$

Съёмки масштаба 1: 1000 000 – 1: 25 000 выполняются в 6° зоне, съёмки более крупных масштабов в 3° зоне.

Элемент площади съёмочной трапеции равен произведению дифференциалов дуг меридианов и параллелей, которыми она ограничена

$$dP = MN \text{Cos}B dB dl. \quad (102)$$

Площадь съёмочной трапеции определяется по формуле

$$\begin{aligned} P &= 2Kl^2 (I - II + III), \quad (103) \\ K &= \frac{\pi b^2}{180^\circ} = 705282.85; \quad I = A' \text{Sin} \frac{1}{2} \Delta B \text{Cos} B_m; \quad II = B' \text{Sin} \frac{3}{2} \Delta B \text{Cos} 3B_m; \\ III &= C' \frac{5}{2} \Delta B \text{Cos} 5B_m; \end{aligned}$$

$$A' = 1.0033635; B' = 0.0011240;$$

$$C' = 0.0000017.$$

Площадь по данной формуле вычисляется с точностью до 0.001 км².

Взаимообратные нормальные сечения.

На поверхности эллипсоида вращения возьмем две точки А и В с широтами B_1 и B_2 . В точках А и В проведем нормали к поверхности эллипсоида n_a и n_b . Проведем через точки А, в и нормали плоскости.

Нормальные плоскости An_aB и Bn_bA между собой не совпадают, т.к. n_a и n_b являются пространственными скрещивающимися прямыми. В пересечении с поверхностью эллипсоида они дадут кривые AaB и BbA . При этом кривая AaB будет прямым нормальным сечением для точки А, а для точки В – обратным нормальным сечением, и наоборот, кривая BbA будет прямым сечением для точки В и обратным для точки А.

Нормальные сечения AaB и BbA называются *взаимно-обратными нормальными сечениями*. Несовпадение взаимно-обратных нормальных сечений называется *двойственностью нормальных сечений*. Двойственность взаимно-обратных нормальных сечений создает помехи при практическом их использовании. Например, измеренные углы треугольника триангуляции проектируются на поверхность эллипсоида нормальными плоскостями, следовательно, контур треугольника из-за двойственности взаимно-нормальных сечений окажется незамкнутым. Для устранения этой неопределенности точки А и В на поверхности эллипсоида соединяют особыми кривыми, называемыми *геодезическими линиями*.

Геодезическая линия соединяет точки на поверхности эллипсоида по кратчайшему расстоянию. Аналогом геодезической линии на плоскости является прямая линия.

В любой точке геодезической линии на поверхности эллипсоида вращения произведение радиуса параллели и синуса азимута геодезической линии – величина постоянная.

$$r \sin A = \text{const} = c, \quad (104)$$

где r - радиус параллели $r = N \cos B$.

Выражение (104) называется уравнением Клеро.

Геодезическая линия на поверхности эллипсоида (при азимутах не близких 90° или 270°) делит угол между взаимно-обратными нормальными сечениями 1:2 и располагается в данной точке ближе к прямому нормальному сечению.

Если азимут геодезической линии $A_{12} = 90^\circ$ или 180° , т.е. точки А и В лежат на одном меридиане, прямое и обратное нормальные сечения и геодезическая линия сливаются. При азимутах близких к 90° и 270° (точки А и В лежат на одной параллели) прямое и обратное сечения совпадают.

Треугольник на поверхности эллипсоида, образованный геодезическими линиями называется *сфероидическим* треугольником.

Решение геодезических задач на поверхности эллипсоида.

Треугольники на референц-эллипсоиде, стороны которых по длине не превышают 250 км, можно считать сферическими, отнесенными к сфере радиуса R_0 , соответствующего средней широте B_0 треугольника на референц-эллипсоиде.

При решении сферических треугольников применяют два метода, позволяющие получить длины сторон треугольников в линейной мере без перевода их в угловую. Такими методами являются решения треугольников по теореме Лежандра и по способу аддитанентов.

Решение малых сферических треугольников по теореме Лежандра.

Если стороны треугольника на референц-эллипсоиде не превышают 250 км, то такой треугольник можно решить по формулам плоской тригонометрии с использованием теоремы Лежандра, принимая его за сферический. В 1887 г. Лежандр доказал теорему, которая гласит:

Если стороны плоского и сферического треугольников равны между собой, то углы плоского треугольника равны соответствующим углам сферического треугольника, уменьшенным на одну треть сферического избытка.

Сферическим избытком ε называется разность между суммой углов сферического треугольника и плоского треугольника.

$$\varepsilon = (A + B + C) - 180^\circ. \quad (105)$$

Решение сферических треугольников сводится к решению плоских треугольников, если углы сферического треугольника исправить соответствующей поправкой равной $1/3$ сферического избытка.

Величина сферического избытка зависит от площади треугольника и от радиуса сферы, на которой находится треугольник, т.е.

$$\varepsilon'' = \frac{P}{R^2} \rho''; \quad (106)$$

где P - площадь треугольника;

R - радиус сферы.

Сферический избыток треугольника может быть вычислен по формулам:

$$\varepsilon = \frac{bc \sin A_1}{2R^2} \rho'' = \frac{ac \sin B_1}{2R^2} \rho'' = \frac{ab \sin C_1}{2R^2} \rho''. \quad (107)$$

Вводя величину $\frac{\rho''}{2R^2} = f$, получим

$$\varepsilon = fbc \sin A_1 = fac \sin B_1 = fab \sin C_1 \quad \text{или}$$

$$\varepsilon = \frac{fb^2 \sin A_1 \sin C_1}{\sin B_1} = f \frac{a^2 \sin B_1 \sin C_1}{\sin A_1} = f \frac{c^2 \sin A_1 \sin B_1}{\sin C_1}, \quad \text{если известны одна сторона и все}$$

углы треугольника. При вычислении сферического избытка стороны выражаются в км.

Углы плоского треугольника могут быть вычислены по формулам:

$$A_1 = A - \frac{\varepsilon}{3}; B_1 = B - \frac{\varepsilon}{3}; C_1 = C - \frac{\varepsilon}{3}. \quad (108)$$

Углы A_1, B_1, C_1 называются плоскими приведенными углами. Значение f для территории СНГ с достаточной точностью можно принимать постоянным и равным 0.00253.

Получив приведенные углы, в дальнейшем треугольник решают как плоский по теореме синусов.

Таким образом, для решения сферического треугольника с использованием теоремы Лежандра выполняют следующие операции:

- 1) вычисляют сферический избыток треугольника по формулам;
- 2) вычисляют невязку плоского треугольника

$$w = (A + B + C) - \varepsilon - 180^\circ \quad (109)$$

и сравнивают ее с допустимой

$$w_{\text{доп.}} = 2.5m_\beta \sqrt{3}. \quad (110)$$

3) если полученная невязка треугольника удовлетворяет условию (98), то результаты наблюдений доброкачественны. В этом случае полученная невязка распределяется поровну в каждый угол треугольника, то есть получаются уравненные сферические углы треугольника

$$A = A_{\text{изм.}} - \frac{w}{3}, B = B_{\text{изм.}} - \frac{w}{3}, C = C_{\text{изм.}} - \frac{w}{3}. \quad (111)$$

- 4) вычисляют углы плоского треугольника

$$A_1 = A - \frac{\varepsilon}{3}, B_1 = B - \frac{\varepsilon}{3}, C_1 = C - \frac{w}{3}. \quad (112)$$

5) используя исходную сферическую сторону и углы плоского треугольника, решают треугольник по теореме синусов по формулам плоской тригонометрии. Если SAB исходная сторона, то

$$S'_{BC} = S_{AB} \frac{\sin A_1}{\sin C_1}, S'_{AC} = S_{AB} \frac{\sin B_1}{\sin C_1} \quad (113)$$

Решение сферических треугольников способом аддитаментов

Если стороны сферического треугольника не превышают 100 км, то появляется возможность решения их по формулам плоской тригонометрии с использованием уравненных сферических углов и исходной сферической стороны, приведенной на плоскость путем введения малой поправки аддитамента.

Способ был предложен в 1820 г. немецким ученым Зельднером.

Формула сферической тригонометрии для вычисления стороны треугольника по исходной стороне и измеренным углам:

$$\sin \frac{a}{R} / \sin A = \sin \frac{b}{R} / \sin B = \sin \frac{c}{R} / \sin C. \quad (114)$$

Пусть сторона a известна и является базисной стороной. Решая треугольник определим сторону b .

$$\sin \frac{b}{R} = \frac{\sin \frac{a}{R} \sin B}{\sin A} \quad (115)$$

Раскладывая \sin в ряд и ограничиваясь двумя членами разложения получим

$$\frac{b}{R} \left(1 - \frac{b^3}{6R^2} \right) = \frac{1}{R} \left(a - \frac{a^3}{6R^2} \right) \frac{\sin B}{\sin A} \quad (116)$$

Введем обозначения

$$A_a = \frac{a^3}{6R^2}, A_b = \frac{b^3}{6R^2}, A_c = \frac{c^3}{6R^2}. \text{ Величина } A \text{ называется аддитаментом стороны.}$$

Стороны плоского треугольника определяются как

$$\begin{aligned} b' &= b - A_b; \\ a' &= a - A_a; \quad b' = \frac{a' \sin B}{\sin A}, \quad c' = \frac{a' \sin C}{\sin A} \\ c' &= c - A_c. \end{aligned} \quad (117)$$

Стороны сферического треугольника

$$\begin{aligned} b &= b' + A_b, \\ c &= c' + A_c \end{aligned} \quad (118)$$

Для контроля определяем

$$a = a' + A_a$$

Для решения сферического треугольника по способу аддитаментов необходимо выполнить следующие операции:

- 1) принимая сторону треугольника a за исходную, вычислить аддитамент этой стороны A_a и вычесть его, приводя исходную сторону на некоторую вспомогательную поверхность;
- 2) по приведенной исходной стороне и сферическим углам вычисляются остальные стороны треугольника. Предварительно невязка треугольника распределяется поровну в каждый угол.
- 3) для каждой приведенной стороны вычисляется аддитамент, прибавляя его к приведенным сторонам получаем стороны сферического треугольника.

Для сторон треугольников до 100 км аддитаменты вычисляются по формулам

$$A_a = ka^3, A_b = kb^3, A_c = kc^3, \quad (119)$$

где $k = \frac{1}{6R^2} = 409 \times 10^{-8}$. Стороны берутся в км.

Способ Лежандра и способ аддитаментов являются наиболее рациональными методами решения малых сферических треугольников, стороны которых не превышают 250 км. В данных способах решение сферических треугольников выполняется по формулам плоской тригонометрии с предварительным преобразованием либо сферических углов, либо сферических сторон треугольника.

Из двух перечисленных способов решения сферических треугольников способ Лежандра имеет преимущество в том, что, при равных объемах вычислений по нему можно решать треугольники с более длинными сторонами.

Для контроля вычислений решение сферических треугольников проводят указанными двумя способами.

Решение главных геодезических задач на плоскости

Определение координат точки по известным координатам других точек и измеренным или заданным угловым и линейным величинам называется главной геодезической задачей.

Главную геодезическую задачу принято рассматривать в виде двух задач: прямой и обратной.

Прямая геодезическая задача на поверхности эллипсоида состоит в том, чтобы по известным координатам начальной точки B_1, L_1 , прямому азимуту A_{12} и расстоянию S между точками Q_1 и Q_2 определить координаты конечной точки B_2, L_2 и обратный азимут A_{21} (рис. 22).

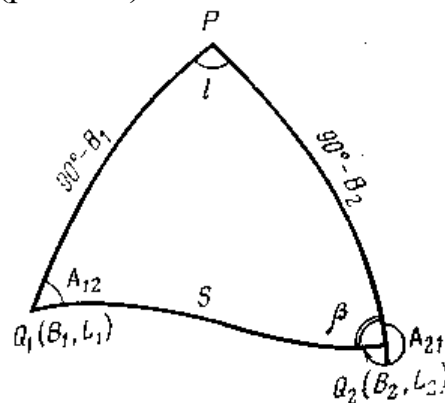


Рис. 22 – Полярный треугольник

Обратная геодезическая задача заключается в том, чтобы по координатам начальной и конечной точек B_1, L_1, B_2, L_2 определить расстояние S между ними и азимуты A_{12} и A_{21} (рис.22).

В общем случае решение главных геодезических задач сводится к вычислению элементов полярного треугольника PAB , где P – полюс эллипсоида, A и B – геодезические пункты. Для решения сфероидического треугольника в нем должно быть известно хотя бы три любых элемента.

При решении прямой геодезической задачи известными считаются элементы:

$\check{P}A = 90^\circ - B_1$, $\check{A}B = S_{AB}$ и сферический угол $\angle PAB = A_{AB}$ - прямой азимут геодезической линии AB .

Необходимо определить:

$P\bar{B} = 90^\circ - B_2$ и $\angle PBA = A_{21}$ - обратный азимут геодезической линии AB , $\angle APB = L_2 - L_1$ - разность долгот пунктов.

При решении обратной геодезической задачи известными считаются: $A\bar{P} = 90^\circ - B_1$, $B\bar{P} = 90^\circ - B_2$ и сферический $\angle APB = L_1 - L_2$. Необходимо найти: $A\bar{B} = S_{AB}$ - расстояние между пунктами, $\angle PAB = A_{12}$ - прямой азимут геодезической линии AB и $\angle PBA = A_{21}$ - обратный азимут геодезической линии.

Решение прямой и обратной геодезических задач производится как прямыми так и косвенными методами.

Прямые методы решения заключаются в непосредственном решении сферического треугольника PAB по известным двум сторонам и углу между ними.

В прямом пути решения главных геодезических задач чаще всего используются способы, основанные на использовании вспомогательной сферы.

При решении треугольников со стороной $AB \leq 600$ км появляется возможность решения малого вспомогательного треугольника ABC по упрощенным формулам с вычислением разностей геодезических координат. Такой путь решения называется *косвенным*.

Решение прямой геодезической задачи косвенным методом на поверхности эллипсоида по методу Рунге – Кутта- Ингланда выгодно применять на расстояния порядка 300 км. В средних широтах он позволяет определять координаты с ошибкой, не превышающей 10-15 см, и азимуты менее $0.003''$. Это численный метод интегрирования дифференциальных уравнений первого порядка. Благодаря удобству программирования метод Рунге – Кутта- Ингланда получил широкое распространение в связи с применением ЭВМ.

Геодезические координаты определяемого пункта и обратный азимут вычисляются по формулам:

$$B_2 = B_1 + \frac{1}{6}(\Delta B_1 + 4\Delta B_3 + \Delta B_4); L_2 = L_1 + \frac{1}{6}(\Delta L_1 + 4\Delta L_3 + \Delta L_4); A_2 = A_1 + \frac{1}{6}(\Delta A_1 + 4\Delta A_3) + \Delta A_4 \quad (120)$$

где

$$\Delta B_i = S_0 V_i^3 \cos \alpha_i; \Delta L_i = S_0 V_i \frac{\sin \alpha_i}{\cos \varphi_i}; \Delta A_i = \Delta L_i \sin \varphi_i. S_0 = \frac{S}{C} \rho'' = 0,0322304 \cdot S$$

$$V_i = \frac{1 + 0.75e'^2 \cos \varphi_i}{1 + 0.25e'^2 \cos \varphi_i}. e'^2 = 0,00673852$$

Значения α_i и φ_i определяют в зависимости от номера приближений i

Таблица 8 - Таблица приближений

i	α	φ
1	$A1$	$B1$
2	$A1 + 0,5\Delta A1$	$B1 + 0,5\Delta B1$
3	$A1 + 0,25(\Delta A1 + \Delta A2)$	$B1 + 0,25(\Delta B1 + \Delta B2)$
4	$A1 - \Delta A2 + 2\Delta A3$	$B1 - \Delta B2 + 2\Delta B3$

Решение обратной геодезической задачи на поверхности эллипсоида по способу Гаусса (по формулам со средними аргументами)

Применение формулы со средними аргументами позволяет вдвое сократить число членов разложения в уравнениях (111) по сравнению с разложением по начальному аргументу, так как в нем исключаются члены с четными производными и четными степенями аргументов.

Решение обратной геодезической задачи по формулам со средними аргументами (способ Гаусса) выполняется по формулам

$$\begin{aligned} S \sin A_m &= D[a_1 \bar{l} + a_2 \Delta \bar{B}^2 \bar{l} + a_3 \bar{l}^3] = D\Sigma_1, \\ S \cos A_m &= D[a_4 \Delta \bar{B} + a_5 \Delta \bar{B} \bar{l}^2 + a_6 \Delta \bar{B}^3] = D\Sigma_2, \\ \Delta A &= \sin B_m [a_7 \bar{l} + a_8 \Delta \bar{B}^2 \bar{l} + a_9 \bar{l}^3] = \sin B_m \Sigma_3, \end{aligned} \quad (121)$$

где

$$m = 593,602160; \quad \Delta \bar{B} = (B_2 - B_1)'' \cdot 10^{-4}; \quad D = \frac{m + \cos^2 B_m}{n + \cos^2 B_m};$$

$$n = 197,867385; \quad \bar{l} = (L_2 - L_1)'' \cdot 10^{-4};$$

$$S_1 = D\Sigma_1 / \sin A_m; \quad S_2 = D\Sigma_2 / \cos A_m; \quad \Delta A = \sin B_m \Sigma_3;$$

$$\operatorname{tg} A_m = S \sin A_m / S \cos A_m;$$

$$A_{12} = A_m - 0,5\Delta A; \quad A_{21} = A_m \pm 180^\circ + 0,5\Delta A.$$

Приведенные формулы позволяют вычислить широту и долготу с точностью до 0.0001-0.0002'' и азимут – до 0.001'' для расстояний до 40 км. Для больших расстояний применяют прямые методы решения.

Гравитационное поле Земли. Уклонения отвесных линий. Системы счета высот. Редукционная задача в геодезии.

Предметом теоретической геодезии является теоретическое обоснование методов решения задач высшей геодезии, среди которых наиболее важной является задача определения фигуры физической поверхности Земли и ее гравитационного поля как на поверхности, так и во внешнем пространстве.

Конечной целью теоретической геодезии является разработка оптимальной и эффективной в некотором смысле стратегии решения ее основных задач. Теоретическая геодезия широко пользуется достижениями смежных наук, а окончательные теоретические выводы могут быть основаны на самом разнообразном составе измерений: традиционных, классических (геодезические, астрономические, гравиметрические измерения), на наблюдениях за искусственными спутниками Земли (ИСЗ), космическими аппаратами (КА), лазерные, доплеровские измерения расстояний до уголкового отражателя на Луне, длиннобазисная радиоинтерферометрия.

Теоретическая геодезия занимается изучением основных задач высшей геодезии:

- определение фигуры Земли;
- определение параметров внешнего гравитационного поля Земли;
- определение параметров, характеризующих взаимное расположение физической поверхности Земли и референц-поверхности;
- изучение изменений поверхности и гравитационного поля Земли во времени;
- определение поверхности относимости и задание системы координат;
- совершенствование методов обработки обширных астрономо-геодезических сетей, создание высокоточной мировой сети опорных пунктов;
- геодинамические явления;
- определение и уточнение фундаментальных геодезических постоянных;

Перечисленные задачи решаются с помощью совместного использования следующих методов:

- астрономо-геодезического метода;
- гравиметрического метода;
- методов, основанных на использовании искусственных спутников Земли и космических аппаратов, лазерной локации Луны, длиннобазисной радиоинтерферометрии.

Гравитационное поле Земли

Внешним гравитационным полем Земли называют совокупность сил тяжести в окружающем Землю пространстве и на ее поверхности.

На материальную точку действуют сила притяжения Земли F и центробежная сила P , возникающая вследствие суточного вращения Земли (рис. 23). Равнодействующая этих сил g составляет силу тяжести Земли.

$$g = F + P. \quad (122)$$

Формирование внешнего вида Земли, т.е. ее фигуры, происходило под действием гравитационных сил. Поэтому изучение гравитационного поля Земли и его свойств имеет важное научное и практическое значение. В геодезии изучение реального гравитационного поля Земли на основе результатов наземных геодезических и гравиметрических измерений, а также методов космической геодезии.

позволяет решить основную задачу геодезии – определение фигуры Земли.

Гравитационное поле Земли характеризуется потенциалом силы тяжести W , который равен сумме потенциалов притяжения и центробежной силы, т.е.

$$W = V + U. \quad (123)$$

Внешнее гравитационное поле Земли изучается, исходя из следующего принципа. Выбирают уровенную поверхность некоторого правильного тела (эллипсоида), а затем определяют отступление гравитационного поля реальной Земли от гравитационного поля выбранного эллипсоида (нормального сфероида), т.е. определяют

$$T = W - U_0, \quad (124)$$

где W - потенциал силы тяжести; U_0 - нормальный потенциал (тела эллипсоида), T - возмущающий потенциал. Таким образом, чтобы знать $W = U_0 + T$, необходимо выбрать U_0 и определить T .

Для выбора нормального потенциала существует несколько способов. Практически за U_0 принимают потенциал, который создает тело эллипсоида вращения (референц-эллипсоида) с массой M и угловой скоростью вращения ω , равными массе и угловой скорости вращения Земли. Такой выбор U_0 приводит к двум важным следствиям:

1. Значение T становится при этом малой величиной, что упрощает его дальнейшее практическое использование.

2. Результаты гравиметрических измерений в этом случае относятся к референц-эллипсоиду, т.е. к поверхности, которая является координатной при геодезических и астрономических измерениях. Поэтому астрономические, геодезические и гравиметрические измерения можно обрабатывать в единой системе координат.

Значение возмущающего потенциала T на континентах, поверхности морей и океанов можно определить гравиметрическим методом.

Возмущающий потенциал характеризуется отступлением поля силы тяжести реальной Земли g от поля силы тяжести эллипсоида γ . Значения силы тяжести получают на поверхности Земли из гравиметрических измерений. Значения силы тяжести на поверхности эллипсоида определяется по теореме Клеро:

$$\gamma_0 = \gamma_e (1 + \beta \sin^2 \varphi), \quad (125)$$

где $\beta = \frac{5}{2}g - \alpha$.

Таким образом, возмущающий потенциал обусловлен разностью $g - \gamma$. Эта разность называется аномалией силы тяжести. Аномалии силы тяжести определяются гравиметрическими методами.

Исходной информацией для характеристики гравитационного поля на материках астрономо-геодезическим методом являются отклонения отвесных линий ξ и η , связь которых с возмущающим потенциалом устанавливается выражениями:

$$\begin{aligned} \xi &= -\frac{1}{R\gamma} \frac{\partial T}{\partial B}; \\ \eta &= -\frac{1}{R\gamma \cos B} \frac{\partial T}{\partial L}. \end{aligned} \quad (126)$$

Следовательно, для определения W астрономо-геодезическим методом необходимо знать (выбрать) нормальный потенциал и иметь астрономические (φ и λ) и геодезические (B и L) координаты пунктов, по которым можно определить отклонения отвесных линий ξ и η .

Уровенные поверхности

Потенциал силы тяжести W зависит только от координат точки пространства (земной поверхности или околоземного пространства), то можно задать такую поверхность, для точек которой потенциал будет постоянным.

Такую поверхность называют *уровенной поверхностью*.

Выражение

$$W = const = C \quad (127)$$

является общим уравнением поверхностей силы тяжести.

В каждой точке такой поверхности сила тяжести направлена по нормали к этой поверхности, а составляющие силы тяжести по касательной к поверхности в любой точке равны нулю.

Уровенные поверхности не могут пересекаться или касаться друг друга, т.к. каждой уровенной поверхности соответствует свое единственное значение потенциала $W = const = C$.

Уровенные поверхности Земли имеют сложную форму, ибо Земля обладает сложной фигурой, распределение плотностей масс, особенно в ее наружных слоях, неравномерно.

Основной уровенной поверхностью Земли является поверхность *геоида*, принимаемая в геодезии за фигуру Земли. Это поверхность, которая приближенно совпадает со спокойной поверхностью Мирового океана и продолженная под материками так, что отвесные линии перпендикулярны в каждой ее точке.

Под поверхностью геоида в настоящее время понимают уровенную поверхность, проходящую через начальную точку отсчета высот. В нашей стране за начало отсчета высот принят нуль Кронштадтского футштока, совпадающий со

средним уровнем Балтийского моря, установленным по многолетним уровнемерным наблюдениям.

Потенциал на поверхности геоида принято обозначать W_0 .

Строгое определение поверхности геоида связано со знанием строения земной коры.

В 1945 г. Молоденский М.С. показал, что можно точно определить фигуру и гравитационное поле Земли, не основываясь на неопределенной поверхности геоида. Он ввел поверхность *квазигеоида*, которая образуется, если отложить от поверхности Земли нормальные высоты H' .

Поверхность квазигеоида совпадает с поверхностью геоида на морях и океанах и на континентальной части максимально отступает от поверхности геоида на 2 м.

Часто на практике геоид заменяют эллипсоидом вращения, поверхность которого принимается за уровенную.

Эллипсоид вращения, центр и экватор которого совпадают с центром масс и экватором Земли и наилучшим образом аппроксимируют поверхность геоида в планетарном масштабе, называется *общеземным эллипсоидом*.

Общеземной эллипсоид, у которого большая полуось a_e , полярное сжатие α , масса M и угловая скорость ω совпадают с соответствующими параметрами Земли, называют *Нормальной Землей*. Параметры Нормальной земли a_e, α, ω , гравитационную постоянную fM называют *фундаментальными геодезическими постоянными*.

Гравитационное поле Нормальной Земли принято за нормальное гравитационное поле Земли.

Уклонения отвесных линий

Уклонение отвеса – это угол между направлением отвесной линии и нормалью к поверхности относимости. Если за поверхность относимости принимают поверхность общего земного эллипсоида, уклонение отвеса называют *абсолютным*. Если рассматривают уклонение отвесной линии от нормали к референц-эллипсоиду, уклонение отвеса называют *относительным*. *Астрономо-геодезическим* уклонением отвесной линии называют угол между отвесной линией и нормалью к референц-эллипсоиду, выведенному по результатам астрономических и геодезических измерений. Они являются относительными.

Направление отвесной линии определяется на земной поверхности из астрономических наблюдений путем вывода астрономических координат (φ, λ) . Направление нормали на поверхности референц-эллипсоида определяется геодезическими координатами B, L .

Гравиметрическим уклонением отвеса называется угол между направлением нормальной γ и реальной g силы тяжести.

Топографическим уклонением отвеса называют отклонение направления реальной силы тяжести от нормальной силы тяжести, обусловленное притяжением топографических масс. Топографические уклонения обычно вычисляют в горах.

При решении геодезических задач величину полного уклонения отвесной линии u представляют в виде двух составляющих: ξ - в плоскости меридиана и η - в плоскости первого вертикала (рис. 23).

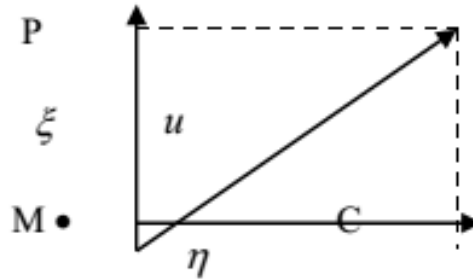


Рис. 23 – Составляющие уклонения отвесной линии

Составляющие астрономо-геодезического уклонения отвеса связаны с разностями геодезических и астрономических координат:

$$\begin{aligned} \xi &= \varphi - B; \\ \eta &= (\lambda - L) \cos B, \end{aligned} \quad (128)$$

где φ, λ - астрономические широта и долгота;

B, L - геодезические широта и долгота пункта.

По формулам () вычислить уклонения отвесных линий можно только в астропунктах. Для всех остальных точек значения уклонения отвеса получают интерполированием.

При интерполировании с использованием гравиметрических уклонений отвеса интерполируют не сами астрономо-геодезические уклонения, а разности $\xi^{AG} - \xi^{GP}$, $\eta^{AG} - \eta^{GP}$ астрономо-геодезических и гравиметрических уклонений отвеса. Астрономо-геодезическое уклонение отвеса в любой точке получается как сумма гравиметрического уклонения отвеса и интерполированной разности уклонений. Полученные таким образом уклонения отвеса называют астрономо-гравиметрическими.

Составляющие уклонений отвеса необходимы для вычисления поправок при переходе от измеренных величин на физической поверхности Земли к поверхности референц-эллипсоида. Уклонения отвесных линий удобные характеристики отступлений действительного гравитационного поля Земли от нормального. Они используются для изучения фигуры Земли. Через уклонения отвесных линий устанавливается связь между астрономическими и геодезическими координатами. Посредством уклонения отвесных линий осуществляется точный переход от измеренного астрономического азимута к геодезическому при помощи уравнения Лапласа

$$A_m = \alpha_m - \eta \operatorname{tg} \varphi. \quad (129)$$

Системы счета высот

При геометрическом нивелировании визирную ось нивелира устанавливают перпендикулярно к отвесной линии и касательно к уровенной поверхности. Геометрическим нивелированием определяют расстояние между уровенными поверхностями, проходящими через нули задней и передней реек. Уровенные поверхности вследствие сжатия Земли, действия сил притяжения и центробежной силы Земли, неравномерного распределения в теле Земли масс с разной плотностью непараллельны между собой. Поэтому измеренные превышения между смежными пунктами зависят от пути нивелирования.

На каждой уровенной поверхности потенциал W постоянен. Следовательно, при сравнении потенциалов уровенных поверхностей их разность не зависит от пути нивелирования. Поэтому при изучении фигуры физической поверхности Земли переходят от действий с измеренными превышениями к операциям с соответствующими разностями потенциалов силы тяжести. В соответствии с общим принципом определения высот в гравитационном поле высота равна отношению разности потенциалов к среднему интегральному значению силы тяжести между соответствующими уровенными поверхностями:

$$H = \frac{W_0 - W_M}{g_m}, \quad (130)$$

где $W_0 - W_M$ - разность потенциалов между точкой B физической поверхности Земли и точкой O отсчетной поверхности; g_m - среднее интегральное значение силы тяжести между этими точками.

Разность потенциалов $W_0 - W_M$ называют геопотенциальным числом (отметкой) точки M .

В геодезических работах применяют три системы геопотенциальных высот: нормальную, ортометрическую и динамическую, а также используют геодезическую систему высот.

Система высот зависит от выбора отсчетной поверхности.

В качестве отсчетной поверхности можно использовать поверхность геоида (ортометрическая высота H^s), поверхность квазигеоида (нормальная высота H^y), поверхность референц-эллипсоида (геодезическая высота H) (рис. 24).

Практически удобнее геодезическую высоту H разделить на две части: гипсометрическую (H^s, H^y), описывающую форму рельефа относительно поверхности геоида и квазигеоида, и геоидальную (ζ), определяющую форму уровенной поверхности или отступление поверхности геоида или квазигеоида от поверхности референц-эллипсоида.

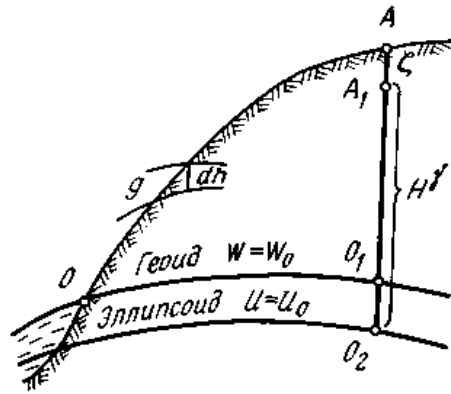


Рис. 24 – Системы высот

Геодезическую высоту представляют как сумму двух слагаемых

$$\begin{aligned} H &= H^s + \zeta_1; \\ H &= H^\gamma + \zeta, \end{aligned} \quad (131)$$

где ζ - аномалия высоты.

Из приведенных формул для вычисления геодезической высоты практически используется вторая. Для определения геодезической высоты по результатам нивелирования и измерений силы тяжести нужно найти нормальную высоту H^γ .

$$H^\gamma = \frac{1}{\gamma_m} \int_{OM} g dh \quad (132)$$

и аномалию высоты ζ .

Нормальная высота вычисляется строго без знания строения земной коры.

Система нормальных высот применяется в СССР и других странах. Нормальные высоты используются в топографических картах и приводятся в геодезических каталогах.

Практически определяют разность нормальных высот точек А и В поверхности Земли. Рабочая формула для вычисления этой разности имеет вид

$$H_B^\gamma - H_A^\gamma = \sum_A^B \Delta h_{изм.} + 1.020 \left[\Sigma(\gamma_{oi} - \gamma_{ok}) H_m^\gamma + \sum_A^B (g - \gamma)_m \Delta h_{изм.} \right] = \sum_A^B \Delta h_{изм.} + \sum_A^B \delta h, \quad (133)$$

где $\Delta h_{изм.}$ - измеренное превышение по секции; H_m^γ и $(g - \gamma)_m$ - средняя высота и средняя аномалия силы тяжести между реперами; $\gamma_{oi} - \gamma_{ok}$ - разность значений нормальной силы тяжести на эллипсоиде на широте репера (i - задний, k - передний по ходу реперы).

При вычислении нормальных высот необходимо знать аномалии силы тяжести в свободном воздухе, для определения которых используют гравиметрические карты в редукции Буге. От аномалий Буге к аномалиям в свободном воздухе переходят по формуле

$$g - \gamma = (g - \gamma)_B + 0.0961H, \quad (134)$$

Редуционная задача в геодезии.

Измеренные на поверхности Земли элементы геодезической сети (длины сторон и горизонтальные направления) редуцируют к поверхности принятого референц-эллипсоида. Теорию перехода от измеренных на земле величин к соответствующим им величинам на поверхности эллипсоида называют редуционной задачей геодезии.

В измеренные горизонтальные направления вводятся поправки за уклонение отвесной линии; за высоту наблюдаемого предмета; за переход от нормального сечения к геодезической линии.

Поправку за уклонение отвесной линии вычисляют по формуле

$$v_1 = (\eta_1^{az} \cos A_{12} - \xi_1^{az} \sin A_{12}) \operatorname{ctg} Z_{12}, \quad (135)$$

где η_1^{az}, ξ_1^{az} - составляющие астрономо-геодезического уклонения отвесной линии в точке стояния прибора; A_{12} - азимут; Z_{12} - зенитное расстояние наблюдаемого направления.

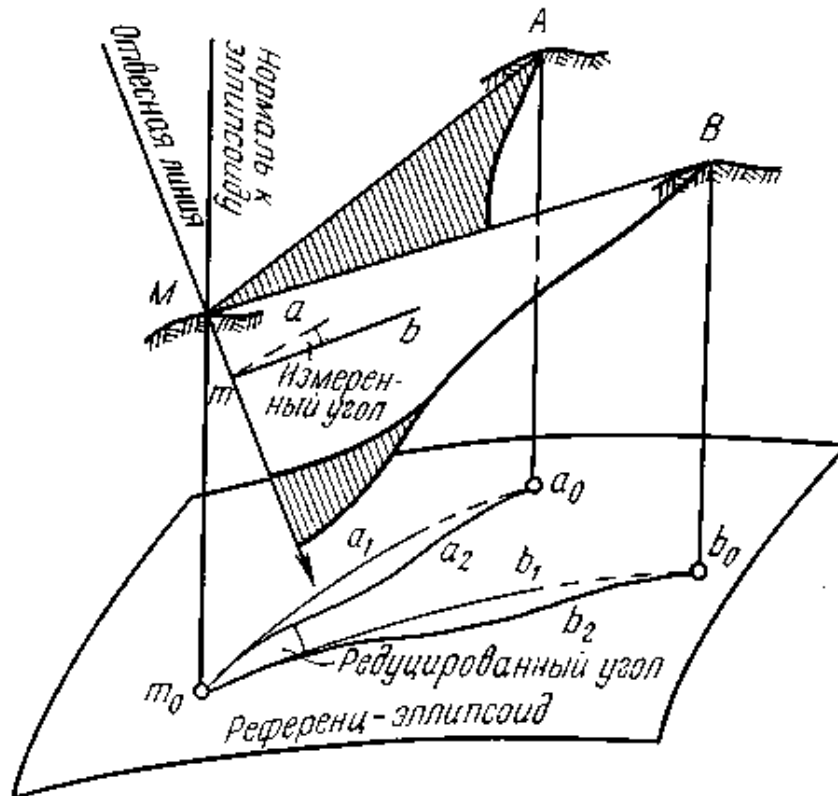


Рис. 25 – Редукция горизонтальных направлений

Поправку за высоту наблюдаемого предмета для эллипсоида Красовского находят по формуле

$$v_2 = 0.108'' H_2 \cos^2 B_2 \sin 2A_{12}, \quad (136)$$

где H_2 и B_2 - геодезическая высота и широта наблюдаемого пункта соответственно.

Поправка за переход от нормального сечения к геодезической линии для эллипсоида Красовского вычисляется по формуле

$$v_3 = 0.0282'' S^2 \cos^2 B_1 \sin 2A_{12}.$$

Редуцирование измеренных дальностей (линий, измеренных свето-и радиодальномерами) выполняется по формуле

$$S = \sqrt{S_{\text{изм.}}^2 - \Delta H^2 \left(1 - \frac{H_1 + H_2}{2R}\right) + \frac{S^3}{24R^2}}, \quad (137)$$

где H_1, H_2 - геодезические точки поверхности Земли; R - средний радиус кривизны эллипсоида вдоль измеряемой линии $R = a \left(1 - \frac{1}{2} e^2 \cos 2B_m\right)$; $\Delta H = H_2 - H_1$.

Геодинамические исследования.

Геодинамика в современной геодезии определяется как наука о внутренней и внешней динамике Земли, развивающаяся на стыке астрономии, геодезии, геологии, геохимии, геоморфологии и других наук о Земле и околоземном пространстве. Геодезия изучает геодинамические явления, связанные с планетарной эволюцией Земли. Предметами геодинамических исследований являются: движения полюсов и центра масс, неравномерное –вращение Земли, деформации земной коры и литосферных плит, изменения береговых линий и уровней морей и океанов, временные изменения ее фигуры и физических полей.

В настоящее время геодинамические аспекты в геодезии при разработке программ наземных и спутниковых астрономо-геодезических и гравиметрических работ становятся определяющим фактором.

Движения полюсов и центра масс, неравномерное вращение Земли, деформации земной коры и литосферных плит, изменения береговых линий морей и океанов, перемещение масс в теле и на поверхности Земли, временные изменения ее фигуры и физических полей – это основной перечень явлений, являющихся предметами геодинамических исследований.

Планетарная и региональная асимметрия масс на поверхности и в теле Земли, гидросфера и атмосфера, находящиеся в постоянном движении, пространственно-временные изменения гравитационного взаимодействия в космической триаде Земля –Луна –Солнце, изменение параметров вращения Земли и литосферных плит относительно их центров инерции обуславливают своеобразную динамику Земли.

В целом спектр геодинамических явлений весьма многообразен: планетарные, относящиеся ко всей планете; региональные, проявляющиеся в пределах континента или литосферных плит; областные, распространяющиеся на территории 1-3 тыс. км; локальные в радиусе 50 ... 500 км.

Геодинамические явления по характеру происхождения разделяются на внутренние и внешние, а по временной шкале – на вековые, долго- и короткопериодические, нерегулярные.

Основным объектом, изучаемым в современной геодезии, является внешняя динамика Земли. Параметры, характеризующие ее, определяются путем наземных и спутниковых астрономо-геодезических и гравиметрических наблюдений.

Самая характерная черта образа Земли – это планетарная асимметрия материков и океанов. На Южном полюсе расположен самый высокий континент – Антарктида, тогда как на Северном полюсе простирается Северный Ледовитый океан. При этом площадь Антарктиды примерно равна площади Северного Ледовитого океана. Впадине Тихого океана отвечает материковый рельеф Африки. Южным океанам, омывающим берега Антарктиды, асимметрию создают материки северного полушария, опоясывающие Арктику. Рельеф Земли асимметричен как по отношению к плоскости экватора, так и к плоскости меридиана 105° восточной долготы. В плоскости этого же меридиана определено направление векового движения земных полюсов.

Планетарные асимметрии суши и океана, рельефа Земли, гидросфера и атмосфера, находящиеся в постоянном движении, обуславливают динамику фигуры планеты под влиянием сил из-за собственного вращения Земли и переменного гравитационного поля в космической системе Солнце- Земля- Луна.

Современные астрономо-геодезические измерения, выполняемые по специальным программам в планетарном и региональном масштабах и обрабатываемые строгими математическими методами, дают надежные оценки движения земной коры и литосферных плит. Из обработки лазерных и радиоинтерферометрических наблюдений небесных объектов установлено, что скорость сближения Тихоокеанской литосферной плиты с Евразией составляет 7 см/год, а скорость раздвижения Североамериканской и Евразийской плит близка к 10 см/год. По данным GPS- наблюдений, выполненных в 1992 – 2001 гг. на 800 пунктах Научной станцией ОИВТ РАН в Бишкеке совместно с американскими, киргизскими, узбекскими учеными установлено, что общее сжатие поперек киргизской части Тянь-Шаня происходит в долготной полосе 75-76° со скоростью 13 мм/год.

Периодически возобновляемые точные нивелировки обнаруживают вертикальные движения земной коры. Зарегистрированы максимальные вертикальные движения земной коры 10 см/год в районе города Алматы.

По интенсивности на Земле происходит 400-1000 семи- и восьмибальных и 10-15 девятибальных землетрясений, которые сопровождаются вертикальными и горизонтальными движениями.

Динамика Земли проявляется в движениях земного полюса и неравномерностях ее вращения. Изменение положения оси вращения Земли в пространстве очень велико.

В первом приближении установлено годовое изменение большой полуоси $a = -0,01 м$, полярного сжатия $\alpha = -1 \cdot 10^{-9} м$, перемещение центра масс Земли $dr = 0,02 м/год$. Вековое движение полюса составляет 0.1 м/год по меридиану 70 ° з.д. Земной полюс за 436.5 суток совершает полный оборот по радиусу 15 м, а за 1 сутки – полный оборот по радиусу 0.05 м.

Использование спутниковых позиционных систем для геодинамических исследований.

Современная техника космической геодезии полностью изменила подход к задаче построения опорной геодезической сети и определения параметров вращения и ориентации Земли. Несмотря на это актуальность этих задач сохраняется и в наши дни.

Для решения данных задач на поверхности планеты построена и развивается Международная земная опорная система координат (ITRF), закрепленная сетью наземных пунктов по возможности равномерно распределенных на поверхности земного шара и фиксированных в земной коре специальными геодезическими марками. Данная сеть должна удовлетворять главному требованию современных геодинамических исследований: построение и сохранение фундаментальной системы координат с точностью 10^{-10} (или 6 мм) на поверхности Земли.

Для поддержания жесткости сети и фиксации движения каждой из континентальной плит на ней должно быть установлено не менее трех станций. Эти станции должны быть размещены на стабильных участках плит.

Высокоточные измерения методами спутниковой геодезии показывают, что начало координатной системы ITRF заметно смещается относительно центра Земли.

При решении многих фундаментальных задач в области наук о Земле, в том числе для определения мест подготовки землетрясений, важно иметь возможность выделить области, где происходят максимальные изменения скоростей сдвиговых деформаций.

До последнего времени определение движений земной коры по GPS измерениям в основном ограничивалось изучением горизонтальных компонент координат станций, поскольку горизонтальные составляющие определялись с высокой (2-3 мм) точностью за 6-7 дневный период измерений. Вертикальная компонента за тот же период могла быть измерена с ошибкой 7-10 мм. Регулярная работа сети постоянно действующих станций сети IGS позволило значительно уточнить модель орбитального движения спутников системы GPS, в результате в два-три раза повысилась точность определения и вертикальной составляющей координат станций.

Международная GPS – сеть для геодинамики IGS насчитывает более 300 постоянно действующих пунктов, из них 16 расположено на территории России и около 10 в странах СНГ.

Среди различных видов мониторинга земной поверхности с применением спутниковых радионавигационных систем выделяют:

Мониторинг международной земной отсчетной системы ITRF, включающий мониторинг тектонических плит, параметров вращения Земли, движения спутников GPS и ГЛОНАСС;

Региональные геодинимические сети размером 100-1000 км;

Локальный геодинимический мониторинг земной поверхности, уровня воды, деятельности вулканов и т. д. (размеры сетей обычно менее 100 км).

Глобальный мониторинг земной поверхности средствами GPS выполняет международная геодинимическая служба (МГС). МГС была организована в 1993 г. для объединения мировых постоянных сетей слежения за спутниками GPS в единую сеть.

В настоящее время действует около 50 основных станций и более 200 функциональных станций. Плотность сети неравномерная. Наибольшая в Западной Европе, США. На территории России две станции – Менделеев и Иркутск.

Наблюдения в региональных и локальных сетях мониторинга обычно проводятся либо циклами, либо непрерывно, либо по смешанной технологии.

Цикловые наблюдения (полевые “кампании”). Геодезическая сеть наблюдается за ограниченный промежуток времени несколькими подвижными приемниками по установленному расписанию перемещений и наблюдений.

Непрерывные наблюдения. Сеть станций непрерывно наблюдает спутники продолжительный период времени. В глобальном масштабе развиваемая сеть GPS – станций слежения обеспечивает доступ к общеземной системе отсчета,

параметрам ориентировки Земли и к точным спутниковым эфемеридам. В региональном масштабе непрерывный мониторинг обеспечивает базовые измерения для полевых съемок с связью с глобальной системой отсчета. Два примера таких сетей: Южно-Калифорнийская объединенная GPS – сеть и Национальный массив GPS станций в Японии. Первая сеть расположена в районе активного взаимодействия Северо-Американской и Тихоокеанской тектонических плит, вторая – состоит из 1000 пунктов со средним расстоянием 30 км и наблюдает скорости смещений на территории Японии.

Смешанные геодезические измерения (многорежимные). При смешанных измерениях полевые приемники определяют свое местоположение относительно массива непрерывно работающих станций. За рубежом эта технология получила название MOST (Multimodal occupation strategy).

К региональным геодинамическим сетям относится Геодинамическая сеть Центральной Европы. Она включает 31 станцию из 11 стран, из них 7 станций входят в глобальную сеть МГС. Наблюдения ведутся циклами из 5-6 суточных сеансов с интервалами записи 30 секунд. При расстояниях между пунктами 300-500 км средние квадратические ошибки определения широт и долгот станций из суточных сеансов составляют 1-2 мм, а для геодезических высот – 5 мм.

Локальные геодинамические сети строят в большом количестве в основном компании. Примером такой сети может служить сеть на Губкинском нефтяном месторождении в Тюменской области. Назначение сети – контроль деформаций земной поверхности в процессе эксплуатации месторождения.

Первоочередные задачи геодезии – это изучение фигуры и физических полей нестационарной Земли. Современные геодинамические исследования в области астрономо-геодезии являются одним из перспективных направлений развития наук о Земле в XXI веке.

15. Геодинамические полигоны

Одной из задач геодинамики, является изучение движений земной коры в сейсмоактивных районах с целью получения данных, необходимых для прогноза сейсмической опасности. Изучение предвестников землетрясений выполняется на специальных построениях, называемых прогностические геодинамические полигоны. Геодинамический полигон – это целесообразно выбранная территория, на которой выполняется комплекс геодезических, геофизических наблюдений, целью которой является определение деформаций земной поверхности.

Основной частью исследований современных движений земной коры геодезическими методами (регионального или местного значения) является их изучение на геодинамических полигонах. В отличие от территорий глобального масштаба наблюдения здесь поставлены на относительно малых участках земной поверхности, которые обычно выбирают в районах активных разломов, на стыках отдельных геологических блоков, в сейсмоактивных областях и т.п. Геодинамические полигоны оборудованы высококачественными геодезическими и геофизическими приборами, которые позволяют производить высокоточные измерения высот, пространственных координат, гравитационного и других полей.

Большое преимущество ГДП в методическом отношении заключается в относительно малых размерах, позволяющих резко повысить качество измерений, а также их частоту, применяя комплекс различных инструментальных методов.

Таким образом обеспечивается возможность изучения с очень большой детальностью характера деформаций земной поверхности на фоне изменений геофизических полей, структуры и рельефа земной коры. Кроме того, ГДП позволяют детально изучить характер и динамику проявления экзогенных деформаций поверхности рельефа и свойства нерегулярности деформаций тектонического происхождения.

Геодинамические полигоны имеют большое значение также для решения вопросов глобального характера. Система ГДП вдоль зон сочленения крупных тектонических блоков позволяет с большой детальностью изучить основные тенденции движений и их изменения во времени и пространстве.

Размещение пунктов планового и высотного геодезических построений на ГДП должно обеспечить решение различных геодезических и геофизических задач. Геодезические построения подразделяются на локальные, когда построение делается в местных тектонических разломах; площадные, когда геодезические построения делаются в районах эпицентров разрушительных землетрясений и региональные, когда построения делаются в крупных геологических структурах.

Локальные и площадные плановые сети создаются в виде угловых, линейно-угловых и линейных построений.

При средней длине стороны до 1.5 км строятся угловые сети. При средней длине стороны от 1.5 до 10 км – линейно-угловые сети и при средней длине сторон более 10 км – линейные сети.

Локальные и площадные высотные сети создаются на трассах в виде линий 1 и 2 классов или в виде полигонов с периметрами до 40 км и больше. На регио-

нальных участках строятся линии 1 класса с полигонами до 400-1000 км и 2 класса – с полигонами 300-600 км.

При локальных построениях пункты плановых и высотных сетей могут совмещаться.

Геодезические построения на ГДП соединяются с государственными геодезическими сетями и сетями высотного нивелирования для получения пунктов в единой системе координат.

Для прогнозирования землетрясений создаются прогностические ГДП. Они дают сведения о предвестниках землетрясений. Контур полигона определяется по положению изосейст (линий равных колебаний) землетрясений.

Создаваемые в настоящее время ГДП в сейсмически активных районах, позволяют установить территории с аномальными скоростями движений и сосредоточить в них полный комплекс исследований с целью решения задач прогноза землетрясений.

Территория южного и Юго-Восточного Казахстана, в том числе и район Алматы, одна из наиболее опасных в СНГ. Для изучения современных движений земной коры, предвестников крупных землетрясений и усовершенствования методики наблюдений СДЗК в Казахстане в 1971-1972 г. началось создание (Малого) Алмаатинского полигона.

В региональном плане район расположен в зоне сочленения северного склона центральной, наиболее высокогорной части хребта Заилийский Алатау с примыкающей к нему с севера Илийской межгорной впадиной и территориально совпадает с Алмаатой. Территория полигона разбита на крупные структурные единицы Алмаатинским, Заилийским, Боролдайским и другими глубинными разломами, связанными с разломами высших порядков. Сами блоки имеют систему разрывов. Взаимосвязь между разломами и взаимообусловленность перемещений по ним определили современную систему тектонических нарушений региона и режим современных горизонтальных и вертикальных движений.

Особенностью Алмаатинского полигона является то, что его плановая и высотная сети создавались специально для изучения СДЗК.

Изучение СДЗК – основная часть большого комплекса работ, проводимых на Алмаатинском ГДП, включает в себя нивелирные и линейно-угловые измерения, наклонно-деформографические и спутниковые наблюдения.

Выбор сети наблюдений – сложный и ответственный вопрос, от которого зависит информативность всего полигона. Пункты наблюдений должны создаваться в наиболее сейсмогенных зонах, вблизи и на самих разломах, где осуществляются интенсивные движения земной коры, в местах наибольших градиентов скоростей движения (зоны сочленения поднимающегося горного массива и опускающейся впадины). Пункты наблюдений должны наиболее полно характеризовать окружающий район, т.е. быть репрезентативными.

Нивелирная сеть полигона представляет собой систему меридиональных трасс, замкнутых субширотными ходами и образует 12 полигонов, покрывающих площадь 200 кв. км. Сеть нивелируется с 1967 года и имеет более 20 повторных измерений. Общая протяженность нивелирных линий, начинающихся на севере в Илийской впадине на широте с. Дмитриевка и заканчивающихся на

юге ходами по ущельям рек Малая и Большая Алмаатинка на широте Медео составляет более 200 км, где фундаментально закреплено более 200 реперов. Нивелирные работы проводились по усовершенствованной программе 1 класса с учетом методических рекомендаций ЦНИИГАИК.

Систематические наблюдения установили высокоградиентные вертикальные движения, в том числе и связанные с проявлением сейсмичности. Особенно интересны результаты на протяженных линиях меридионального направления. Геодезические наблюдения позволили выявить значительные движения земной коры в пределах полигона. Выявлены неравномерные во времени вертикальные движения до 20 мм в год, что превышает средний темп движения в 4-5 раз. Преобладающими тенденциями для вертикальных движений являются: прогиб Алмаатинской впадины с наклоном к югу и вовлечение в поднятие Заилийского Алатау наклонной предгорной равнины с преобладающим наклоном к северу.

Схема линейно-угловой сети связана с тектоническими блоками. Плановая геодезическая сеть имеет среднюю сторону 7.7 км, состоит из 21 пункта, покрывает площадь около 515 кв. км. Кроме линейных и угловых измерений обеспечена астроопределениями и нивелированием II класса.

Линейно-угловая сеть содержит 21 пункт, сплошная, охватывает южную часть Илийской впадины, предгорную наклонную равнину и прилавки хребта Заилийский Алатау.

Пункты расположены на разных тектонических блоках. Из сети можно выделить две цепочки: одна имеет направление вдоль предгорий и пересекает 7 тектонических блоков; вторая – вдоль предгорной долины и пересекает 5 блоков. Для исключения возможных ошибок, обусловленных построением большой сети, построено 3 локальных четырехугольника со сторонами 2.2-5.4 км. Их вершины расположены так, что две находятся по одну сторону разлома, а две – по другую. Появляется возможность контролировать их взаимную устойчивость, а уменьшение длины повышает точность определения взаимного положения.

Для горизонтальных наблюдений на Алмаатинском ГДП использованы два геодезических четырехугольника линейно-угловой сети, расположенные в эпицентральной зоне Верненского землетрясения.

Наблюдения показали, что для разных частей полигона деформирование имеет разнородный характер. Границы этих областей маркируются нулевыми изолиниями и приурочены к Алмаатинскому и Предгорному разломам, по которым происходит процесс «разламывания». Наклон одной из зон является продолжением процесса прогиба Алмаатинской депрессии, а наклон второй зоны вызван вовлечением наклонной предгорной равнины в процесс поднятия подножия Заилийского Алатау.

Процесс деформирования территории полигона как единого блока в горизонтальной плоскости носит знакопеременный характер: растяжение сменяется интенсивным сжатием, затем полное отсутствие деформаций, затем опять сжатие. Тем не менее, деформированное состояние территории полигона с течением времени нарастает. Преобладающими тенденциями горизонтального деформирования является сжатие территории.

Техногенное вмешательство человека в природу не только нарушает равновесие сложившихся экологических систем, но активно воздействует и на геодинамические процессы. Одной из форм проявления такого воздействия являются так называемые возбужденные землетрясения. В мировой практике отмечены многочисленные случаи возникновения землетрясений, сопровождающих инженерную деятельность человека.

Техногенные полигоны создаются в местах эксплуатации месторождения полезных ископаемых и интенсивного использования подземных вод.

Целью устройства геодезических полигонов является изучение смещений геодезических знаков и деформации ЗП на территориях эксплуатируемых месторождений жидких, газообразных и твердых полезных ископаемых.

Влияние деятельности человека (откачка грунтовых вод, нефти и газа, шахтные выработки и т.д.) приводит обычно к необратимым смещениям поверхности земли.

Приведем некоторые данные. В районе Донбасса. Подмосковного и других угольных бассейнов в местах горных выработок наблюдалось опускание ЗП более чем на 2 метра. Область опускания поверхности земли распространяется не только непосредственно на район горных выработок, но и выходит за пределы этого района, поскольку проходка горных выработок связана с интенсивной откачкой грунтовых вод, которая понижает их уровень на значительной территории, прилегающей к району разработок. Однако наряду с опусканием ЗП, нередко имеет место поднятие.

Откачка грунтовых вод, главным образом в целях водоснабжения, также приводит к значительному оседанию земной поверхности. Так, например, в долине р. Джакин (штат Калифорния) откачка грунтовых вод за 22 года привела к осадке ЗП на 4.4 м., в г. Мехико в ряде районов за последние 30 лет отмечается осадка ЗП до 6 м. При этом оседание почвы происходит не только в местах откачки воды, нефти и газа, где оно наиболее значительно, но и далеко за пределами этих мест, где величина оседания постепенно убывает.

Требования к выбору полигонов:

1. Месторождение должно иметь небольшой срок эксплуатации и обладать мощными нефте-газо и водоносными горизонтами.
2. Месторождение должно быть обособлено от смежных эксплуатируемых, расстояние 40-50 км.
3. Должно непрерывно эксплуатироваться.
4. Территория месторождения по возможности должна отвечать условиям удобства выполнения геодезических измерений.
5. В зонах месторождений нефти следует учитывать, что в результате эксплуатации мест уплотнение пластов и оседания земной поверхности наиболее значительны при отборе нефти без закачки воды в нефтеносные горизонты.
6. При выработке твердых полезных ископаемых в задачу геодезических полигонов входит решение вопросов, связанных с оседанием земной поверхности в следствии откачки подземных во

В процессе рекогносцировки корректируется камеральный проект, отыскиваются пункты старых сетей и намечаются места закладки новых. Особое вни-

вание уделяется выбору мест закладки фундаментальных реперов. Они выбираются геологом.

При недостаточности исходных данных расстояние между границей месторождения и опорными реперами на концах висячих ходов, приближенно можно принимать равными не менее чем 6-8 кратной глубине залегания нижних эксплуатируемых пластов, но во всех случаях не менее 5 км.

Должна быть рассмотрена привязка к нивелирной сети полигона обсадных труб глубинных не работающих скважин, как в зоне месторождения, так и за ее пределами.

Закрепление линий производится реперами, типы которых предусмотрены действующими инструкциями.

Расстояние между смежными знаками не более 2 км в пределах зоны месторождения и не более 4-5 км на линиях, выходящих за пределы этой зоны.

Фундаментальные реперы в узлах отдельных полигонов сети, а также на радиальных линиях. Расстояние между ними не превышает 15-20 км. Число фундаментальных реперов в зоне месторождения не менее 4.

На территории полигона прокладывается нивелирование 2 класса в виде системы пересекающихся линий, образующих полигоны с периметром 25-30 км. Концы линий, пересекающих месторождение, должны выходить за его границы не менее чем на 5 км и закрепляться фундаментальными реперами.

Нивелирование полигонов выполняется по программе 2 класса в наиболее удобное время года. Первое повторное нивелирование спустя 3-4 года после начального. В дальнейшем периоды между нивелировками устанавливаются в зависимости от скорости вертикальных движений ЗП, выявленных в результате повторного нивелирования. При скорости оседания ЗП до 2 мм в год интервалы между нивелировками не менее 4 лет.

Развитие плановых сетей целесообразно лишь в случае значительных вертикальных смещений ЗП (5 см в год).

При очень вытянутой форме месторождения полигон может состоять из линии 2 класса проходящей по продольной оси месторождения и нескольких поперечных линий, секущих примерно под прямым углом продольную линию через 10-20 км. На концах всех этих линий (за пределами зоны действия техногенных процессов) закладываются опорные реперы.

На городских территориях полигоны для изучения откачки грунтовых вод должны строиться в виде системы малых замкнутых полигонов, с учетом расположения улиц.

Выявление техногенных и сеймотектонических движений усложняется в районах месторождений, если они расположены в зонах повышенной сейсмической активности. Скорость техногенного движения зависит от пяти факторов:

Глоссарий

Базис геодезический – расстояние между двумя закрепленными на местности точками, измеренное с высокой точностью и служащее для определения сторон триангуляции

Базисная сеть – геодезическое построение на местности, связывающее измеренный базис со стороной триангуляции.

Вес урванного значения измеренной величины – при совместном уравнивании совокупности равноточно измеренных величин вес может быть подсчитан по формуле среднего отношения весов

$$\left(\frac{P}{p}\right)_{cp.} = \frac{n}{k}$$

где P - вес урванного и p - вес измеренного значения величины; n - число всех измеренных величин, k - число необходимых величин.

Видимость геодезическая – отсутствие препятствий, закрывающих визирный луч. Состояние атмосферных условий, влияющих на качество изображения визирных целей при рассматривании их в зрительную трубу прибора.

Высота геодезическая – высота точки земной поверхности над поверхностью референц-эллипсоида, отсчитанная по нормали к эллипсоиду. Высота геодезическая определяется как сумма нормальной высоты и аномалий высоты.

Гаусса проекция – изображение поверхности эллипсоида на плоскости под следующими условиями, предложенными немецким ученым К.Ф. Гауссом:

- 1) один из меридианов эллипсоида принимается за осевой и изображается на плоскости осью абсцисс с сохранением длин дуг меридиана;
- 2) проекция равноугольна (сохраняет на плоскости углы изображаемых фигур).

Геодезическая линия – линия кратчайшего расстояния на какой-либо поверхности. На поверхности эллипсоида вращения – линия двойкой кривизны, в каждой точке которой соприкасающаяся плоскость проходит через нормаль к поверхности в той же точке. Для геодезической линии на шаре и эллипсоиде произведение радиуса параллели какой-либо точки на синус азимута геодезической линии в той же точке есть величина постоянная для данной геодезической линии.

Геодезическая сеть – система пунктов на земной поверхности, закрепленных на местности специальными знаками и центрами, положение которых определено в плановом отношении и по высоте.

Геоид – фигура Земли, образованная уровенной поверхностью, совпадающей в открытых морях и океанах с их спокойной поверхностью и продолженной под материками.

Геоцентрические координаты – система, началом координат в которой принят центр масс Земли.

Каталог координат геодезических пунктов – систематизированный список пунктов, расположенных на площади листа карты масштаба 1: 200 000 или на

участке района работ, в котором указываются названия и класс пунктов, прямоугольные координаты, абсолютные высоты.

Квазигеоид (почти геоид) – близкая к геоиду вспомогательная поверхность в теории М.С. Молоденского изучения фигуры Земли и ее гравитационного поля. Строго определяется относительно поверхности референц-эллипсоида по результатам астрономических, геодезических и локальных гравиметрических измерений на земной поверхности.

Координатные зоны – ограниченные двумя меридианами части земной поверхности (сфероидические двуугольники), каждая из которых изображается на плоскости совершенно одинаковым образом в плоских прямоугольных координатах в принятой в СССР проекции Гаусса. Зоны имеют размеры 6° и 3° по долготе.

Космическая (спутниковая геодезия) – раздел геодезии, изучающий проблемы использования искусственных спутников Земли в геодезических целях.

Лазерная локация Луны – метод измерения расстояний до отражателей, установленных на Луноходах и Аполлонах.

Лапласа пункт – геодезический пункт, на котором были определены астрономические азимут и долгота, широта.

Магнитная аномалия – резкое отклонение величин магнитного склонения и наклонения в различных районах земной поверхности от средних их значений, которые должны были бы быть в этих районах при отсутствии аномалий.

Меридиан геодезический – линия на земной поверхности, все точки которой имеют одну и ту же геодезическую долготу.

Нивелирование астрономическое – определение по уклонениям отвесной линии высот геоида, а с использованием геометрического нивелирования – высот точек земной поверхности над референц-эллипсоидом.

Нивелирование астрономо-гравиметрическое – определение высот точек поверхности квазигеоида над референц-эллипсоидом по уклонениям отвесной линии и аномалиям силы тяжести в свободном воздухе в ограниченной области вдоль линии нивелирования.

Нивелирование тригонометрическое – метод определения разностей высот точек земной поверхности по измеренному углу наклона линии визирования с одной точки на другую и измеренному расстоянию между этими точками.

Нормальная Земля – теоретическая модель Земли в виде эллипсоида вращения с полуосями и массой такими, что при его вращении вокруг малой оси с угловой скоростью, равной скорости вращения Земли, значение нормального потенциала на его поверхности есть величина постоянная. Поверхность такого эллипсоида называют также уровенной поверхностью.

Нормальное сечение – линия пересечения поверхности плоскостью, проходящей через нормаль к этой поверхности в какой-либо ее точке.

Нормальные значения силы тяжести – значения силы тяжести, соответствующие теоретической модели Земли, называемой Нормальной Землей.

Общий земной эллипсоид – земной эллипсоид, поверхность которого наиболее близка поверхности геоида в целом. Общий земной эллипсоид определяется тремя условиями: совпадения малой оси эллипсоида со средним положением оси

вращения Земли; совпадения центра эллипсоида с центром масс Земли; минимума среднего квадратического превышения геоида над эллипсоидом.

Отвесная линия – направление вектора силы тяжести в данной точке. Направление отвесной линии характеризуется астрономическими координатами – широтой и долготой, определяемыми из астрономических наблюдений.

Полигонометрия – метод определения положения геодезических пунктов путем проложения на местности ломанной линии или системы связанных между собой ломанных линий (полигонометрических ходов), в которых измеряются все углы и стороны.

Потенциал силы тяжести – физическая величина, характеризующая поле силы тяжести в данной точке. Линия, по которой направлен вектор силы тяжести, называется отвесной линией.

Приведение направлений к центрам пунктов - производится путем введения поправок в измеренные направления за внецентренное положение теодолита и визирной цели.

Привязка геодезической сети – включение в создаваемую сеть элементов ранее проложенной сети в качестве исходной основы или с целью присоединения к ней.

Принцип наименьших квадратов – математическое условие, налагаемое на отыскиваемую совокупность поправок к приближенным значениям математически связанных между собой искомым величин, состоящее в требовании, чтобы сумма квадратов поправок была минимальной.

Проекция равноугольные – (конформные) – проекции эллипсоида или шара на плоскость, сохраняющие углы изображаемых фигур,

Пространственные прямоугольные координаты – система трехмерных линейных прямоугольных координат XYZ с началом координат в центре земного эллипсоида, направлением оси Z по малой оси (оси вращения) эллипсоида на север, расположением оси X в плоскости первого геодезического меридиана, а оси Y – в плоскости меридиана с геодезической долготой $L = 90^{\circ}$.

Радиоинтерферометрический метод наблюдений ИСЗ – для высокоточного определения направлений на ИСЗ. Разность фаз, принимаемых интерферометрами сигналов, пропорциональна отрезку между двумя точками, на которых установлены радиоинтерферометры.

Радиус кривизны меридиана – обозначается M и является функцией геодезической широты в этой точке

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 B)^{3/2}}.$$

Радиус кривизны нормального сечения-

$$R_a = \frac{MN}{N \cos^2 A + M \sin^2 A}.$$

Редукция расстояния в проекции Гаусса – поправка, вводимая в расстояние между двумя точками на поверхности эллипсоида, для получения расстояния между изображениями этих точек на плоскости.

Редукция направления в проекции Гаусса – поправка, вводимая в измеренное направление за переход от кривой, изображающей на плоскости геодезическую линию, соединяющую две точки поверхности эллипсоида, к хорде этой кривой.

Референц-эллипсоид – эллипсоид вращения принятых размеров, определенным образом ориентированный в теле Земли, на поверхность которого относятся геодезические сети при их вычислении.

Сила тяжести – равнодействующая силы притяжения Земли и центробежной силы, возникающей вследствие вращения Земли вокруг ее оси.

Спутниковая альтиметрия – метод определения высот квазигеоида на акватории Мирового океана относительно земного эллипсоида.

Триангуляция – метод определения относительного (взаимного) планового положения геодезических пунктов путем построения на местности систем смежно расположенных треугольников, в которых измерены их углы, а в сети – длину хотя бы одной стороны, называемой базисом или базисной.

Трилатерация – метод определения взаимного планового положения геодезических пунктов путем построения на местности систем смежно расположенных треугольников, в которых измеряется длина их сторон.

Уклонение отвесной линии – астрономо-геодезическое – угол между направлением отвесной линии в данной точке земной поверхности и нормалью к поверхности референц-эллипсоида; гравиметрическое (абсолютное) уклонение отвесной линии – угол между направлением отвесной линии в данной точке и проходящей через эту точку нормалью к отсчетной поверхности уровенного эллипсоида, принятого за поверхность общего земного эллипсоида в решаемой задаче.

Уровенная поверхность – поверхность, пересекающая отвесные линии во всех ее точках под прямым углом; с физической точки зрения это поверхность во всех точках которой значение потенциала силы тяжести одно и то же.

Фундаментальные геодезические постоянные – характеристики модели Земли как физического тела в виде эллипсоида вращения.

Широта астрономическая – угол, образованный направлением отвесной линии в данной точке земной поверхности с плоскостью небесного экватора; этот угол равен углу, образуемому осью вращения Земли с плоскостью горизонта данной точки.

Широта геодезическая – угол, образованный нормалью к поверхности референц-эллипсоида в данной точке с плоскостью экватора.

Эксцентриситет меридианного эллипса – функция длины большой полуоси и малой полуоси эллипса, обозначаемая e .
$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}.$$

Эллипсоид земной – двухосный эллипсоид (сжатый эллипсоид), поверхность которого принимается в геодезии за математическую фигуру Земли

Библиографический список

Основная литература

1. Машимов М.М. Геодезия. Теоретическая геодезия.- М.: Недра, 1991
2. Закатов П.С. Курс высшей геодезии.- М.: Недра, 1976
3. Яковлев Н.В. Высшая геодезия .-М.: Недра, 1989
4. Хаимов З.С. Основы высшей геодезии.- М.: Недра, 1984
5. Яковлев Н.В. Практикум по высшей геодезии.- М.: Недра, 1982
6. Болотов П.А. Практикум по основным геодезическим работам.- М.: Недра, 1977
7. Мазницкий А.С., Сова В.Г. Маркшейдерско-геодезические работы на месторождениях нефти и газа.- М.: Недра, 1979

Дополнительная литература

8. Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии.- М.: Недра, 1979
9. Бойко Е.Г. и др. Использование искусственных спутников Земли для построения геодезических сетей.- М.: Недра, 1979
10. Машимов М.М. Уравнивание геодезических сетей.- М.: Стройиздат, 1975
11. Инструкция о построении государственной геодезической сети, ГУГК.- М.: Недра, 1979
12. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов, ГУГК.- М.: Недра, 1970
13. Инструкция по вычислению нивелировок, ГУГК.- М.: Стройиздат, 1989
14. Земцова А.В. Преобразование координат геодезических пунктов из системы в систему, мет. указания.- КазНТУ, 2005
15. Земцова А.В. Предварительные вычисления в триангуляции, мет. указания.- КазНТУ, 2004
16. Земцова А.В. Измерение горизонтальных направлений и углов, мет. указания.- КазНТУ, 2005
17. Земцова А.В. Геодезические работы на ГДП.- Алматы, 1998
18. CREDO. Инженерно-геодезические и землеустроительные работы, НПО «КРЕДО-ДИАЛОГ», Минск, 2000.
19. CREDO. От изысканий до проекта. НПО «КРЕДО-ДИАЛОГ» Минск, 2000.
20. Геодезия и картография, журнал М.: Недра
21. Маркшейдерский вестник, журнал М.: П-центр

Содержание

Задача дисциплины.....	12
1. Предмет и задачи высшей геодезии. Основные понятия и определения. Основные методы изучения фигуры	21
2. Земли и внешнего гравитационного поля.....	24
3. Геодезические сети Республики Казахстан, их назначение, схема и принцип построения.....	32
4. Методы построения плановых опорных геодезических сетей.....	
5. Общие принципы использования ИСЗ в геодезических целях. Спутниковые навигационные системы.	50
Высокоточные угловые измерения. Высокоточные угломерные приборы. Способы высокоточных угловых измерений.	57
6. Высокоточные линейные измерения.	67
Радиоэлектронные методы измерения расстояний.	
7. Предварительные вычисления. Уравнивание сети коррелятным и параметрическим способами.	75
8. Высокоточное нивелирование.....	
9. Сфероидическая геодезия. Основные параметры земного эллипсоида...	81
10. Системы координат.....	
Установление параметров связи координатных систем различных эллипсоидов. Местные системы координат.	
13. Решение сфероидических треугольников и главных геодезических задач на поверхности эллипсоида.....	85
Гравитационное поле Земли. Уклонения отвесных линий. Системы счета высот. Редукционная задача в геодезии.	94
14. Геодинамические исследования.	
15. Геодинамические полигоны.....	102
Глоссарий.....	106
Библиографический список.....	116

