

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ (МИИГАиК)**

КАФЕДРА ВЫСШЕЙ ГЕОДЕЗИИ

Шануров Геннадий Анатольевич

ВЫСШАЯ ГЕОДЕЗИЯ: ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Учебное пособие для студентов обучающихся по направлениям:
«геодезия и дистанционное зондирование», «прикладная геодезия», «землеустройство
и кадастр», «картография и геоинформатика»**

Москва 2015

Оглавление

Введение.....	4
1. Предмет высшей геодезии.....	5
2. Геометрический аспект высшей геодезии	6
2.1. Понятие о местоположении	6
2.2. Связь измеряемых величин и определяемых величин	8
3. Геодезические сети	9
3.1. Пункты геодезических сетей.....	10
3.2. Типы и назначение геодезических сетей	14
3.3. Методы создания геодезических сетей	15
3.3.1. Плановые геодезические сети	15
3.3.2. Высотные геодезические сети.....	20
3.3.3. Гравиметрические сети.....	20
3.3.4. Геодезические сети, создаваемые спутниковым методом	21
3.4. Геодезическая сеть Российской Федерации	23
4. Геодезическая метрология	24
5. Физический аспект высшей геодезии.....	28
5.1. Характеристики поля силы тяжести Земли	28
5.2. Геоид	30
5.3. Превышение и высота.....	32
5.4. Системы высот	33
6. Земной эллипсоид	37
6.1. Общеземной эллипсоид, Нормальная Земля	38
6.2. Референц-эллипсоид	39
7. Системы координат и системы времени	39
7.1. Геодезическая прямоугольная система координат, связанная с положением оси вращения Земли на эпоху наблюдений	39
7.2. Геодезическая прямоугольная система координат, фиксированная на исходную фундаментальную эпоху.....	40
7.3. Связь между инерциальной системой координат и земной системой координат	42
7.4. Референцная система координат: региональная и локальная	43
7.5. Геодезическая эллипсоидальная система координат.....	43
7.6. Динамическое время	44
7.7. Атомное время.....	44
7.8. Астрономическое время, связь астрономического времени и атомного времени	45
7.9. Время, реализуемое спутниковой системой	45
7.10. Астрономические координаты, отклонения отвесных линий	46
7.11. Редуцирование результатов измерений на поверхность земного эллипсоида	47

7.12. Системы отсчёта, используемые в высшей геодезии	48
8. Практическая реализация инерциальной системы координат и земной системы координат	49
8.1. Практическая реализация инерциальной системы координат	50
8.2. Искусственные спутники Земли LAGEOS и ЭТАЛОН	51
8.3. Практическая реализация земной системы координат	52
9. Сочетание космических и наземных методов высшей геодезии	55
10. Термины высшей геодезии	58
Литература	62

Введение

Учебное пособие составлено на основе опыта работы со студентами вечернего и заочного отделений факультета дистанционных форм обучения Московского государственного университета геодезии и картографии - МИИГАиК. Последовательность изложения материала соответствует последовательности лекций по курсу «Высшая геодезия», которые автор читает в аудитории.

В задачи, стоящие перед высшей геодезией, входит изучение фигуры Земли и внешнего поля силы тяжести Земли. С течением времени фигура Земли и характеристики поля силы тяжести изменяются. Изучение этих изменений также входит в круг задач, стоящих перед высшей геодезией. Разные специалисты в области высшей геодезии обозначали и обозначают термином «фигура Земли» разные понятия. Специалисты в области физической геодезии и гравиметрии под этим термином понимали и понимают глобальный геоид, то есть одну из множества эквипотенциальных (уровенных) поверхностей поля силы тяжести Земли. Специалисты в области создания опорных геодезических сетей наземными и космическими методами понимали и понимают физическую поверхность Земли как поверхность, фиксированную центрами пунктов опорной геодезической сети. Оба эти подхода к определению и пониманию термина «фигура Земли» имеют право на существование, не исключают друг друга, а, скорее, взаимно друг друга дополняют.

В учебном пособии рассмотрены методы создания опорной геодезической сети: наземные методы и космические методы. Соответствующую совокупность задач и методов решения этих задач называют *геометрическим аспектом высшей геодезии*. *Физический аспект высшей геодезии*, то есть совокупность задач, связанных с изучением поля силы тяжести Земли и с интерпретацией результатов этого изучения в интересах высшей геодезии, автор рассмотрел в том объёме, в каком ему позволила его компетентность в этой области. Рассматривая проблемы физической геодезии, автор основывался исключительно на работах авторитетных в этой области специалистов.

Автор использует учебное пособие в процессе преподавания курсов «Высшая геодезия» и «Спутниковая геодезия» студентам МИИГАиК, проходящим обучение по специальностям «прикладная геодезия», «геодезия и дистанционное зондирование», а также по специальности «землеустройство и кадастр». Кроме того, это учебное пособие используют аспиранты, работающие над подготовкой своих кандидатских диссертаций под руководством автора, а также студенты-магистранты, которым автор преподаёт курс «Фундаментальные и прикладные координатные и временные основы геодезии и дистанционного зондирования».

Приступающий к изучению курса «Высшая геодезия» должен иметь подготовку в области высшей математики, в области геодезии и в области сферической астрономии, достаточную для того, чтобы оперировать такими, например, понятиями, как *интеграл*, *матрица*, *нивелирование*, *измерение угла и/или расстояния*, *экваториальные координаты светила (небесного тела)*.

1. Предмет высшей геодезии

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Закалов], [Красовский, 1942], [Красовский, 1955], [Маркузе], [Молоденский], [Огородова, 1978], [Огородова, 2006], [Пеллинен], [Торге], [Юзефович], [Яковлев], [Burša], [Moritz] и [Torge].

Высшая геодезия как наука обладает следующими двумя существенными признаками. Первый, необходимый существенный признак состоит в том, что имеет место конкретный *предмет изучения*. Вторым, достаточным существенным признаком состоит в том, что специалисты, работающие в данной области деятельности, располагают конкретным *средством изучения* данного предмета или объекта. Предметом изучения высшей геодезии является *Земля как планета*, средством изучения является *измерение*. Существуют несколько наук, которые изучают Землю: география, геология, геофизика, океанография. Геодезия вообще и высшая геодезия в частности является одной из старейших наук, изучающих Землю. Каково же место высшей геодезии среди других наук о Земле? Не обсуждая предмет или предметы, которые изучают другие науки о Земле, напишем следующее. Предметом изучения специалистов, работающих в области высшей геодезии, как это определено в основополагающих трудах, является *фигура Земли и поле силы тяжести Земли*. Изучение фигуры Земли и поля её силы тяжести включает определение изменений формы и размеров физической поверхности Земли во времени, а также включает определение изменений параметров поля силы тяжести Земли во времени. Изучение фигуры Земли и её изменений – это, как написано, преимущественно геометрический аспект высшей геодезии, а изучение внешнего гравитационного поля Земли и его изменений – это преимущественно физический аспект высшей геодезии. Эти два аспекта высшей геодезии неразрывно связаны. Невозможно изучить фигуру Земли, не изучив поле силы тяжести Земли. И наоборот, невозможно изучить поле силы тяжести Земли, не изучив фигуру Земли. Чтобы подчеркнуть взаимосвязь геометрического и физического аспекта высшей геодезии, напишем следующее. Результаты измерения силы тяжести и результаты высокоточного и точного нивелирования совместно используют для определения высот реперов нивелирных сетей. Эти реперы, также как и центры других опорных геодезических сетей, фиксируют, в геометрическом смысле, фигуру Земли. Изменения высот реперов интерпретируют как современные вертикальные движения земной коры, то есть, как изменения фигуры Земли.

Как написано, средством изучения в высшей геодезии, как и в геодезии вообще, является измерение. Измерение – это процедура или процесс сравнения неизвестной заранее с требуемой точностью величины с *эталоном* или с представителем этого эталона. Понятие эталона и понятие представителя эталона дано в разделе 4. Пока же ограничимся простейшим примером. Метровый интервал между штрихами рулетки является представителем государственного (национального) эталона метра. Результатом измерения является численное значение измеряемой величины и характеристика точности этого значения. В геодезии и в геодезической астрономии измеряют *угловые и линейные величины*.

Измеряемые *угловые величины* – это горизонтальные углы и вертикальные углы – углы наклона или зенитные расстояния. Кроме того, измеряемые угловые величины – это астрономические широты, астрономические долготы и астрономические азимуты. Измеряемые *линейные величины* – это расстояния между пунктами, превышения, полученные из геометрического нивелирования. С помощью дальномеров измеряют (определяют) именно расстояния между пунктами. Существуют радиогеодезические системы, в том числе и спутниковые системы, в которых измеряемыми величинами

являются не только расстояния (дальности), но и *разности расстояний*, *скорости изменения расстояний*. Кроме того, при создании гравиметрических сетей и при выполнении гравиметрической съёмки измеряют *ускорение силы тяжести* на пунктах земной поверхности и *разности ускорения силы тяжести* на этих пунктах.

2. Геометрический аспект высшей геодезии

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Галазин], [Голубев], [Маркузе], [Одуан], [Пеллинен], [Серапинас], [Шануров] и [Torge].

Зачем и почему геодезист измеряет угловые и линейные величины? Зачем наблюдатель устанавливает над центром геодезического пункта дальномер, теодолит или антенну спутникового геодезического приемника? Каков конечный результат этих действий? Ответим на эти заданные нами же вопросы так: конечным результатом этих действий является определение *местоположения пунктов*, на которых установлены геодезические приборы и/или инструменты.

2.1. Понятие о местоположении

Местоположение пункта и/или объекта можно задать относительно фиксированных на местности и легко опознаваемых ориентиров. Можно сказать или написать, что объект находится во дворе дома, расположенного в городе Удоев (здесь и далее все названия населенных пунктов являются условными) по такому-то адресу. Можно сказать или написать, что объект находится на таком-то километре шоссе Крутово - Урга. На застроенной территории местоположение пункта задают, выполнив промеры от капитальных зданий и сооружений. Такую форму задания местоположения используют в виде абриса или кроки на этапе рекогносцировки и обследования.

Окончательный же результат определения местоположения в геодезии задают в форме *координат*. Координаты пунктов опорной геодезической сети, сопровождаемые характеристикой их точности, есть конечный результат деятельности специалиста в области высшей геодезии, то есть, астронома – геодезиста.

Координаты пункта или пунктов - это числа, которые этим пунктам приписаны. Но эти числа нельзя приписать произвольно. Расстояния, вычисленные по разностям координат пунктов, должны быть равны, на требуемом уровне точности, реально существующим и измеренным расстояниям между этими пунктами. Углы между направлениями на пункты, вычисленные по разностям координат пунктов, должны быть равны, опять же на требуемом уровне точности, реально существующим и измеренным углам между направлениями на эти пункты. Из курса аналитической геометрии известно, что значения расстояний и значения углов инвариантны относительно системы координат, то есть эти величины не зависят от того, какая именно система координат выбрана и использована. Поэтому можно сделать следующее уточнение: координаты геодезических пунктов - это *упорядоченная система* чисел, *условно* приписанных этим пунктам. Кроме того, координаты, как и любые полученные геодезистом результаты, необходимо сопровождать оценкой точности.

Результатом деятельности геодезиста, создающего опорную геодезическую сеть, то есть, специалиста в области высшей геодезии, является *каталог* координат пунктов этой геодезической сети. Каталог содержит координаты пунктов и данные о точности этих координат. «Точность» есть понятие качественное. Количественной характеристикой точности измеряемых и определяемых величин является *средняя квадратическая ошибка*

этих величин. Исчерпывающую количественную характеристику точности координат пунктов геодезической сети даёт *ковариационная матрица* координат пунктов этой геодезической сети.

В высшей геодезии и в геодезии вообще местоположение пунктов задают в форме координат, то есть используют аппарат аналитической геометрии потому, что это - удобно. Удобство заключается в том, что при обработке результатов измерений, при получении окончательных результатов, включая оценку точности, возможно, использовать математический аппарат и компьютерные программы. Проблема состоит в том, что следует на необходимом уровне точности задать (фиксировать) систему координат. Требуется также хранить (поддерживать) эту систему координат и оценивать этот уровень точности. Точность задания и поддержания системы координат должна соответствовать точности современной геодезической аппаратуры. Например, если мы работаем с дальномером, позволяющим измерять расстояния с ошибкой в один миллиметр, то и координаты пунктов, на которых мы работаем (разности координат этих пунктов), должны быть заданы и/или определены с ошибками, не превышающими одного миллиметра.

Земную (общеземную) систему координат задают каталоги координат *пунктов глобальной геодезической сети*. Эти пункты расположены на поверхности всех материков и на островах. На каждом таком пункте расположен комплекс аппаратуры. В этот комплекс входят *радиотелескопы*, наблюдающие внегалактические радиоисточники - *квазары*, входят также *лазерные светодальномеры*, наблюдающие специальные геодезические искусственные спутники Земли LAGEOS и ЭТАЛОН, входят спутниковые приемники, наблюдающие спутники систем GPS Navstar и ГЛОНАСС, другая геодезическая, гравиметрическая и астрономическая аппаратура. Каждый такой пункт является постоянно действующей *астрономо-геодезической обсерваторией*. Сеть этих пунктов, как написано, представляет собой *глобальную геодезическую сеть*. Именно пункты глобальной сети задают *земную (общеземную) систему координат* на миллиметровом уровне точности. На эту сеть опираются все остальные геодезические сети, в том числе и *спутниковые сети*.

Написанное выше соответствует геометрическому аспекту высшей геодезии. Физический аспект высшей геодезии также играет важную роль в задании системы координат. На всей поверхности Земли, в том числе и на пунктах геодезической сети, необходимо определить с соответствующей точностью значение *ускорения силы тяжести*. Результаты измерения ускорения силы тяжести используют для определения *фигуры геоида (квазигеоида)*. К поверхности геоида (квазигеоида) подбирают *земной (общеземной) эллипсоид*. Земной эллипсоид является исходной поверхностью в системе *геодезических координат*.

2.2. Связь измеряемых величин и определяемых величин

Геодезист измеряет линейные величины и угловые величины потому, что эти величины *функционально связаны* с определяемыми величинами: с координатами пунктов или, чаще всего, с *разностями координат пунктов*. Геодезист выполняет измерения затем, чтобы, получить определяемые величины, сопроводив их соответствующими точностными характеристиками. Например, расстояние D между двумя пунктами и разности координат ΔX , ΔY , ΔZ этих двух пунктов связаны соотношением, которое в общем случае называют *уравнением связи*:

$$D^2 = \Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2 \quad . \quad (2.1)$$

Измеряемой величиной является расстояние. Определяемыми величинами являются разности координат. Для получения определяемых величин на основе результатов измерений используют *способ наименьших квадратов*.

3. Геодезические сети

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Баранов], [Голубев], [Закатов], [Красовский, 1942], [Красовский, 1955], [Крылов, 2002], [Кузнецов], [Молоденский], [Морозов], [Огородова, 1978], [Огородова, 2006], [Пеллинен], [Прилепин], [Серапинас], [Торге], [Урмаев], [Харисов], [Центры], [Шануров], [Юзефович], [Яковлев], [Hofmann] и [Torge].

Геодезическая сеть состоит из *геодезических пунктов*, закреплённых на земной поверхности центрами. Координаты центров геодезических пунктов определены в единой для этой геодезической сети системе координат. Примером геодезической сети может служить приведённая на рисунке 3.1 геодезическая сеть Москвы [www.geodinamika.ru].

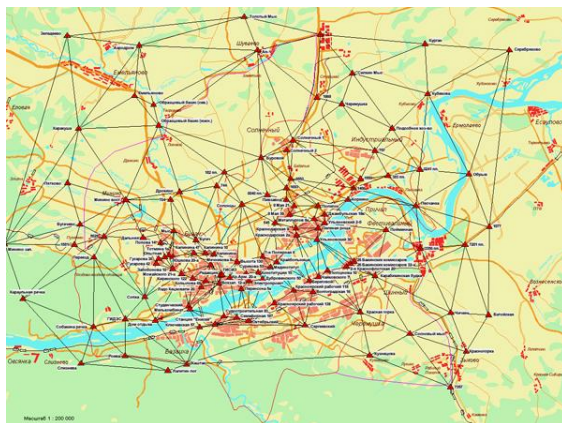


Рисунок 3.1. Геодезическая сеть Москвы

До появления в геодезической практике космических методов и, в частности, спутниковых методов, *плановые* геодезические сети создавали с использованием наземных методов: триангуляции, трилатерации и полигонометрии, а также с использованием методов геодезической астрономии. Эти методы называют также традиционными методами.

3.1. Пункты геодезических сетей

Геодезический пункт состоит из центра и наружного знака. Центр геодезического пункта во многих случаях представляет собой железобетонный пилон, заложённый в грунт на глубину около 1.5 метров. Чертёж такого центра приведен на рисунке 3.2.

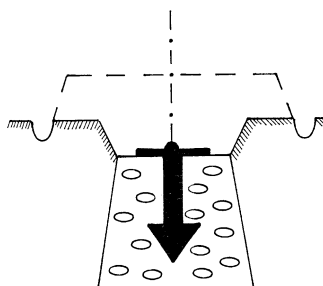


Рисунок 3.2. Центр геодезического пункта

В верхнюю часть пилона вмурована металлическая марка, имеющая индивидуальный номер. Верхняя часть пилона и марка расположены ниже поверхности земли. В центре марки расположен полусферический выступ. В центре этого выступа имеется углубление. Именно это углубление (насечка) хранит координаты данного пункта геодезической сети. Конструкции центров разнообразны. Например, в условиях вечной мерзлоты или в сыпучем грунте в качестве центра применяют металлическую трубу длиной в несколько метров, снабжённую якорем. На рисунке 3.3 дано изображение марки, закреплённой на такой металлической трубе [www.nakor.ru].



Рисунок 3.3. Марка центра геодезического пункта

В горных районах марку вмуровывают прямо в скалу. На рисунке 3.4 показан геодезический пункт Мякипяллюс, расположенный на острове Гогланд и представляющий собой сварной металлический штатив, вмурованный в железобетонное основание. На штативе установлена антенна геодезического спутникового приёмника. Таким образом, данное сооружение одновременно выполняет функции центра пункта, функции штатива и функции наружного знака.



Рисунок 3.4. Геодезический пункт Мякипяллюс

Ранее, когда опорные геодезические сети создавали с использованием наземных методов, необходима была видимость между соседними пунктами. Эту видимость обеспечивали, сооружая над центрами геодезических пунктов наружные знаки: сигналы и пирамиды. Фотография деревянного трёхгранного геодезического сигнала приведена на рисунке 3.5 [geodesist.info].

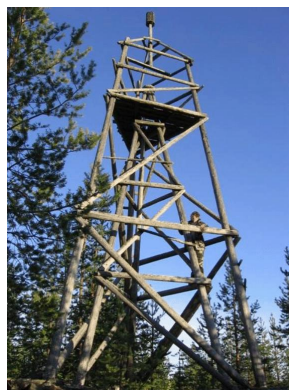


Рисунок 3.5. Геодезический сигнал

В верхней части сигнала расположена площадка с перилами для наблюдателя. Вся эта площадка, включая пол, опирается на внешнюю пирамиду сигнала. Столик для установки прибора опирается на внутреннюю пирамиду. Внешняя и внутренняя пирамиды сигнала не соприкасаются друг с другом. Сигнал такой конструкции называют простым сигналом. Венчает сигнал (внешнюю пирамиду) визирный цилиндр, служащий визирной целью при выполнении угловых измерений с соседних пунктов. Высота изображённого на рисунке 3.5 сигнала невелика: метров 15 от земли до верха визирного цилиндра. В таёжной местности сигналы имели высоту в 25-30 метров и более. У таких сигналов внутренняя пирамида опиралась на столбы внешней пирамиды двумя ярусами ниже пола площадки наблюдателя и назывались такие сигналы сложными. Существовали не только трёхгранные сигналы, но и четырёхгранные сигналы. В обжитой местности сооружали металлические сигналы. Фотография верхней части сложного металлического сигнала высотой метров в 20 приведена на рисунке 3.6 [findmapplaces.com].



Рисунок 3.6. Сложный металлический сигнал

Технология работы на сигналах сложна. Чего стоил только подъём аппаратуры на сигнал и спуск этой аппаратуры. Помимо выполнения наблюдений необходимо было измерить высоту сигнала, определить элементы приведения и совершить ещё несколько технологических операций типа восстановления окопки сигнала и, при необходимости, мелкого ремонта самого сигнала. Измерение высоты сигнала означает измерение расстояний от центра пункта до оси вращения зрительной трубы установленного на столике теодолита или дальномера и до верха визирного цилиндра. Определение элементов приведения означает определение смещений оси вращения алидады установленного на столике теодолита (оси вращения дальномера) и оси визирного цилиндра относительно центра пункта: величин этих смещений и направлений этих смещений. Процедура выполнения угловых измерений и измерения расстояний с использованием светодальномера требовала высочайшей квалификации наблюдателя и его помощника.

В малозалесённой равнинной, всхолмлённой и горной местности в качестве наружных знаков использовали металлические или деревянные пирамиды высотой в 3-6 метров. На рисунке 3.7 приведена фотография изготовленной из металлического уголка геодезической пирамиды [to21.rosreestr.ru].



Рисунок 3.7. Геодезическая пирамида

На постройку и ремонт наружных знаков уходила большая часть средств, выделяемых на производство геодезических работ. Сейчас, когда спутниковый метод

создания геодезических сетей заменил наземные методы измерений, наружные знаки не строят и используют сохранившиеся знаки только в качестве ориентиров.

3.2. Типы и назначение геодезических сетей

Существует *глобальная* геодезическая сеть. Эту сеть создали и непрерывно совершенствуют с использованием метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) и метода лазерной локации искусственных спутников Земли.

Существуют *региональные* геодезические сети. Региональная геодезическая сеть покрывает территорию страны и/или территории группы соседствующих стран. Примером является геодезическая сеть Российской Федерации. Региональные геодезические сети ранее создавали с использованием наземных традиционных методов. В настоящее время эти сети создают и совершенствуют с использованием спутниковых систем глобального позиционирования. Исходными пунктами для региональной геодезической сети являются пункты глобальной геодезической сети.

Существуют *локальные* геодезические сети. Локальная геодезическая сеть покрывает территорию города или района. Примером является геодезическая сеть Москвы, приведённая на рисунке 3.1. Также как и региональные геодезические сети, локальные сети ранее создавали с использованием наземных методов. В настоящее время для этого используют спутниковые системы глобального позиционирования. Исходными пунктами для локальной геодезической сети являются пункты региональной геодезической сети.

Высокоточные и точные высотные (нивелирные) сети создают, сочетая геометрическое нивелирование и данные гравиметрии. Гравиметрические сети создают с использованием баллистических гравиметров, позволяющих измерять абсолютные значения ускорения силы тяжести, и, по большей части, с использованием статических гравиметров, позволяющих измерять разность ускорения силы тяжести на пунктах гравиметрической сети.

Создание и поддержание опорных (государственных) геодезических сетей - это задача специалистов, работающих в области высшей геодезии. Именно пункты геодезических сетей фиксируют, в дискретной форме, физическую поверхность Земли, то есть, задают фигуру Земли. И именно эту физическую поверхность Земли, а также ее изменения во времени, изучает высшая геодезия как наука. В практическом смысле геодезические сети служат основой для выполнения картографических, топографических, инженерных и кадастровых работ.

3.3. Методы создания геодезических сетей

В настоящее время основным методом создания геодезических сетей является спутниковый метод, то есть, метод, основанный на использовании спутниковых систем глобального позиционирования GPS Navstar и ГЛОНАСС. Традиционными, наземными методами создания геодезических сетей являются триангуляция, трилатерация, полигонометрия, геометрическое нивелирование и гравиметрия.

3.3.1. Плановые геодезические сети

Методами триангуляции, трилатерации и полигонометрии создавали опорные геодезические сети, которые называют *плановыми сетями*. Идеализированная схема плановой геодезической сети приведена на рисунке 3.8.

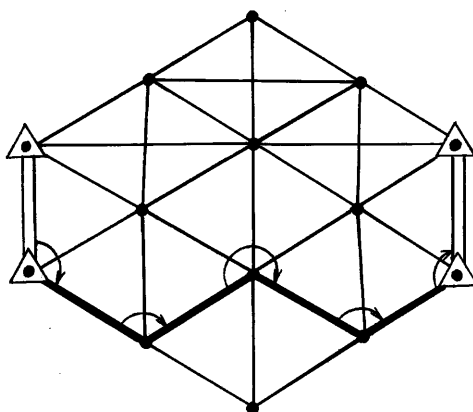


Рисунок 3.8. Плановая геодезическая сеть

Изображенная на этом рисунке геодезическая сеть идеализирована потому, что состоит из равнобедренных треугольников. Реальные геодезические сети, одна из которых приведена на рисунке 3.1, состоят из треугольников (фигур) разной формы. Три треугольника, расположенные в верхней части рисунка 3.8, попарно пересечены диагональю. Пару таких треугольников называют геодезическим четырёхугольником. Геодезические четырёхугольники повышают жёсткость сети, но создавать их возможно только тогда, когда имеется видимость между пунктами по этой дополнительной диагонали. Кружками на рисунке 3.8 показаны определяемые пункты, треугольными значками обозначены исходные пункты, двойными линиями показаны базисные стороны. В плановой геодезической сети необходима видимость между соседними пунктами. Если измеряют углы, то геодезическая сеть является сетью триангуляции. Угловые измерения выполняли с использованием высокоточных и точных оптических теодолитов. На рисунке 3.9 приведена фотография точного теодолита ОТ-02М, с помощью которого измеряли и измеряют углы с ошибкой в одну угловую секунду [vts.mybb.ru].



Рисунок 3.9. Теодолит ОТ-02М

Геодезическая сеть Советского Союза – Государственная геодезическая сеть (ГГС) СССР создана методом триангуляции, хотя инструкция о построении ГГС допускала использование для этой цели методов полигонометрии и трилатерации. Формировали эту сеть по принципу «перехода от общего к частному»: ГГС СССР подразделяли на четыре класса. Сеть триангуляции 1 класса строили в виде звеньев (рядов) длиной около 200 километров, простиравшихся, по большей части, вдоль меридианов и вдоль параллелей. Звенья образовывали полигоны. Сеть триангуляции 2 класса как сплошная сеть заполняла полигон 1 класса. Схема такого полигона приведена на рисунке 3.10 [гост-снип-рд.рф].

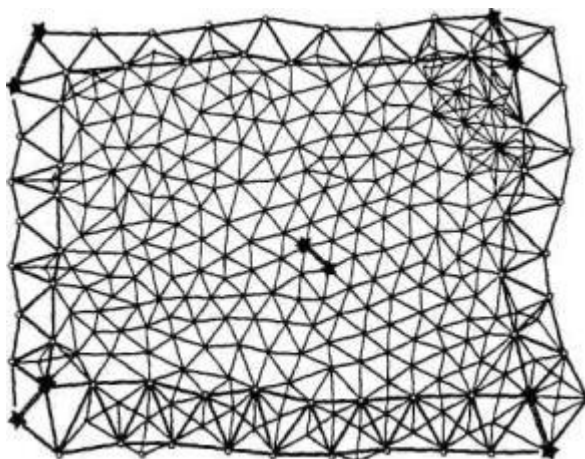


Рисунок 3.10. Полигон триангуляции 1 класса

Звёздочками обозначены пункты Лапласа. На этих пунктах методами геодезической астрономии измеряли астрономические координаты пунктов: широты и долготы, а также измеряли астрономические азимуты направлений, соединяющих эти пункты. Определяли также длины сторон, соединяющих пункты Лапласа; их называли базисными сторонами. Вначале для этого строили базисные параллактические сети; для измерения длин базисов использовали мерные приборы в виде инварных проволок. Позже для измерения длин базисных сторон стали использовать светодальномеры. Поскольку в сети триангуляции 1 и 2 класса выполнены и астрономические и геодезические измерения, эту сеть называли *астрономо-геодезической сетью*, а специалисты в области создания этой сети имеют квалификацию «астроном-геодезист». Сети триангуляции 3 и 4 классов являются сетями сгущения для сетей 1 и 2 классов; это показано в верхнем правом углу рисунка 3.10.

Исходным пунктом ГГС СССР является центр круглого зала Пулковской обсерватории. Фотография здания Пулковской обсерватории приведена на рисунке 3.11 [Фотоэкскурсия по Пулковской обсерватории – Персональный сайт].



Рисунок 3.11. Здание Пулковской обсерватории

Фотография круглого зала Пулковской обсерватории приведена на рисунке 3.12 [Фотоэкскурсия по Пулковской обсерватории – Персональный сайт].



Рисунок 3.12. Круглый зал Пулковской обсерватории

На рисунке 3.13 приведена фотография центра круглого зала Пулковской обсерватории, через который проходит Пулковский меридиан [Фотоэкскурсия по Пулковской обсерватории – Персональный сайт].



Рисунок 3.13. Центр круглого зала Пулковской обсерватории

На рисунке 3.14 приведена фотография пассажного инструмента Пулковской обсерватории [Фотоэкскурсия по Пулковской обсерватории – Персональный сайт].

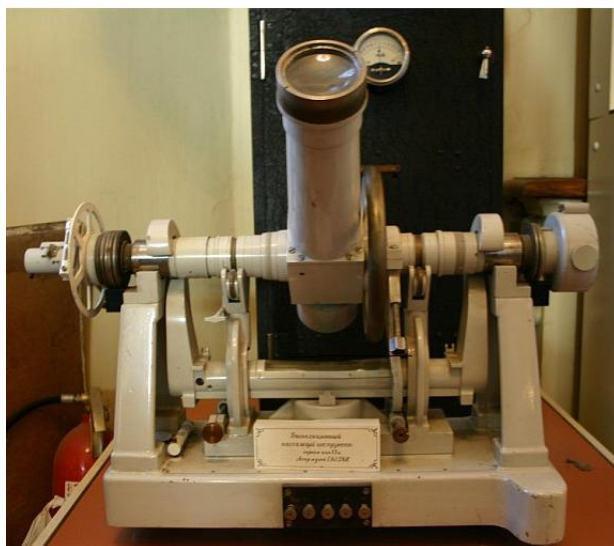


Рисунок 3.14. Пассажный инструмент Пулковской обсерватории

Если измеряют длины сторон, смотри рисунок 3.8, то геодезическая сеть является сетью трилатерации. Если измеряют длины сторон, показанных на рисунке 3.8 утолщенными линиями, а также измеряют углы, показанные круговыми стрелками, то соответствующая ломаная линия представляет собой ход полигонометрии. Если во всей сети измерены все углы и длины всех сторон, то такую геодезическую сеть называют комбинированной. Длины базисных сторон в сети триангуляции, длины сторон в сети трилатерации и в ходах полигонометрии измеряли с использованием высокоточных и точных электронных светодальномеров. На рисунке 3.15 дана фотография высокоточного светодальномера Geodolite 3G, способного измерять расстояния до 100 километров с ошибкой 1 миллиметр плюс 1 миллиметр на километр [historywired.si.edu].



Рисунок 3.15. Светодальномер Geodolite 3G

Пункты плановых геодезических сетей, созданных наземными методами, располагали на командных высотах с тем, чтобы обеспечить возможность взаимной видимости между пунктами и при этом не строить слишком высокие сигналы.

В плановых геодезических сетях для измерения длин сторон использовали радиодальномеры. Радииодальномер состоит из двух станций, которые устанавливают на концах измеряемой линии. На рисунке 3.16 приведена фотография станции радиодальномера Tellurometer MRA-6 [xnatmap.org]. С помощью этого радиодальномера измеряли расстояния длиной до 50 километров с ошибкой 10 миллиметров плюс 3 миллиметра на километр. Работа с радиодальномером в сравнении со светодальномерными наблюдениями гораздо более проста и оперативна. Нет необходимости дожидаться оптической видимости по измеряемой дистанции и нет

необходимости в процессе измерений поддерживать строгое наведение антенн станций одной на другую. В настоящее время радиодальномеры, к сожалению, в геодезической практике не используют: они не обеспечивают столь высокую точность, которую обеспечивают светодальномеры, и не позволяют определять сразу разности координат пунктов, как это делают спутниковые приёмники.



Рисунок 3.16. Станция радиодальномера Tellurometer MRA-6

Результатом создания плановой геодезической сети являлся каталог координат пунктов этой сети. Каталог этот содержит геодезические широты B и геодезические долготы L пунктов сети, а также средние квадратические ошибки этих координат. Помимо сфероидических геодезических координат B и L пунктов геодезической сети вычисляют координаты X и Y этих же пунктов на плоскости геодезической проекции Гаусса-Крюгера. Эти координаты называют плановыми координатами. Каталог содержит эти плановые координаты, сопровождаемые их средними квадратическими ошибками. В процессе создания плановой геодезической сети на каждом пункте, помимо измерений горизонтальных углов и/или расстояний, измеряли зенитные расстояния (углы наклона) на верх визирных цилиндров наблюдаемых соседних пунктов. Это означает, что в сети выполняли тригонометрическое нивелирование. Результаты измерения зенитных расстояний, в основном из-за влияния вертикальной рефракции, имели невысокую точность. Поэтому высоты пунктов плановой геодезической сети, полученные из тригонометрического нивелирования, содержали ошибки в несколько дециметров. Более того, строго говоря, высоты пунктов, полученные из тригонометрического нивелирования, нельзя отнести к какой-либо *системе высот*. Высоты пунктов плановой геодезической сети играли второстепенную роль в сравнении с их плановыми координатами. Однако точность определения высот пунктов плановой геодезической сети была достаточной для того, чтобы *проектировать* результаты угловых и линейных измерений на поверхность *эллипсоида относимости*. Иными словами, ошибки определения высот пунктов плановой геодезической сети не вносили существенных ошибок в *поправки за редуцирование* на поверхность эллипсоида относимости результатов измерений углов и расстояний, выполненных в этой сети.

В настоящее время пункты геодезических сетей, созданных традиционными наземными методами, используют на локальных участках и объектах в качестве исходных при создании там локальных геодезических сетей спутниковым методом. Кроме того, ГГС СССР вошла составной частью в Государственную геодезическую сеть Российской Федерации, создаваемую космическими методами и, в частности, спутниковыми методами.

3.3.2. Высотные геодезические сети

Высотные (нивелирные) геодезические сети создавали и создают геометрическим нивелированием в сочетании с гравиметрическими данными. Принципиальная схема высотной сети приведена на рисунке 3.17.

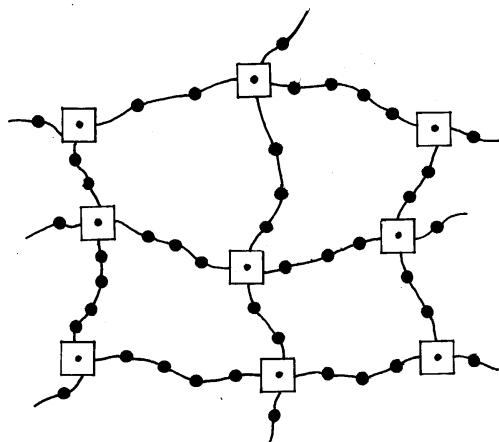


Рисунок 3.17. Высотная (нивелирная) геодезическая сеть

Реперы, хранящие результаты нивелирования I и II классов, то есть, нивелирования высших классов, устанавливали и устанавливают, в отличие от пунктов плановых сетей, в местах со сравнительно спокойным рельефом и с возможностью беспрепятственного проложения между ними нивелирных ходов, например, вдоль автомобильных и железных дорог. Вместе с тем, существуют нивелирные сети высших классов, расположенные в горной местности. Однако, это является скорее исключением, чем правилом. Из сказанного следует, что плановая геодезическая сеть и высотная геодезическая сеть существовали и существуют в значительной мере раздельно: пункты этих сетей по большей части не совмещены.



Рисунок 3.18. Нивелир Н05

Для создания государственных высотных нивелирных сетей используют высокоточные и точные нивелиры. На рисунке 3.18 приведена фотография высокоточного нивелира Н05 [gskgeo.ru]. Точность работы этого нивелира характеризуется ошибкой в 0,5 миллиметра на километр нивелирного хода.

3.3.3. Гравиметрические сети

Пункты гравиметрической сети служат в качестве исходных (опорных) при выполнении гравиметрической съёмки и при практической реализации системы

нормальных высот на территории страны. На рисунке 3.19 приведена схема пунктов гравиметрической сети Российской Федерации [geod.ru].

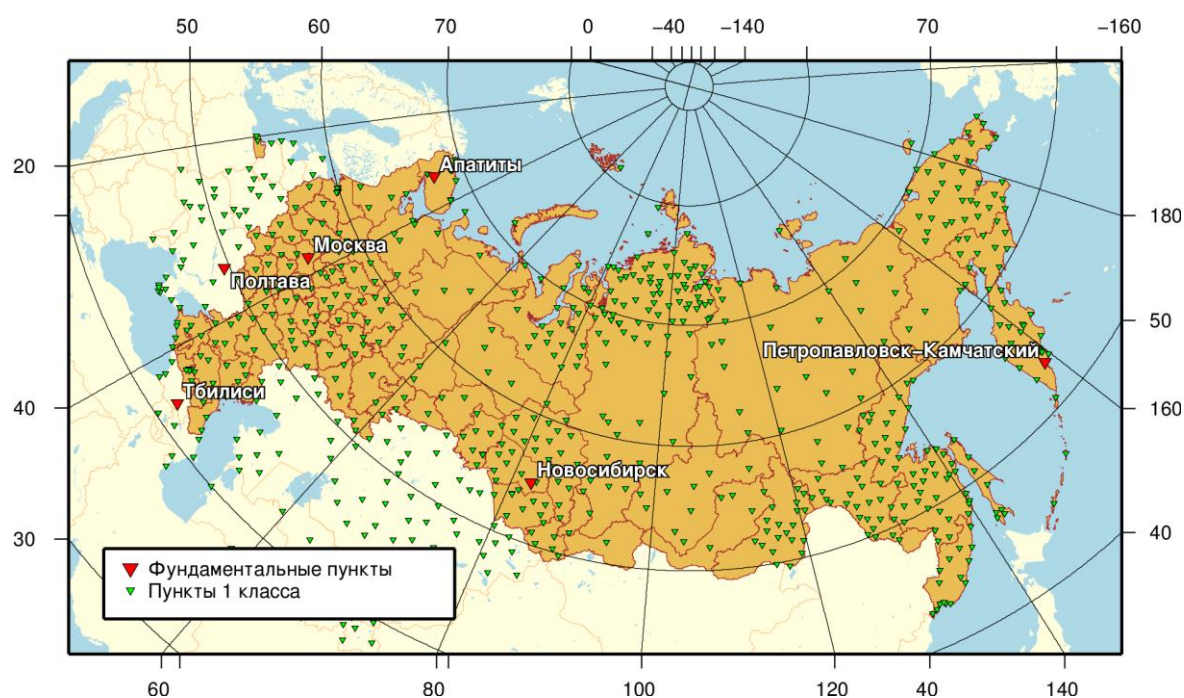


Рисунок 3.19. Гравиметрическая сеть Российской Федерации

Наземные методы создания геодезических сетей исчерпывающим образом описаны в классических трудах по высшей геодезии и по гравиметрии, часть из которых дана в перечне, приведённом в начале этого раздела.

3.3.4. Геодезические сети, создаваемые спутниковым методом

Как написано, основным и практически единственным методом создания региональных и локальных геодезических сетей в настоящее время является спутниковый метод. Процедуру спутниковых наблюдений на двух пунктах иллюстрирует рисунок 3.20.

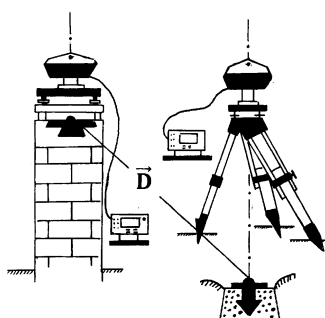


Рисунок 3.20. Спутниковые приёмники, установленные на пунктах геодезической сети

В иллюстрируемом случае антенна одного из спутниковых приёмников установлена на столбе (туре), в верхнюю часть которого вмурована марка. Вместо марок используют приспособления для принудительного центрирования антенны. Такие основательно закреплённые пункты как правило уже имеют координаты, то есть, они играют роль исходных пунктов. Установленный на таком пункте спутниковый приёмник называют *референчным приёмником*, а сам пункт называют *референчным пунктом*. Пункт и приёмник в совокупности называют *референционной станцией*. Антенна другого приёмника установлена над центром, имеющим конструкцию, аналогичную приведённой

на рисунке 3.2. Если этот пункт является определяемым, то установленный на нём приёмник называют *роверным приёмником*.

Спутниковый метод создания геодезических сетей имеет многочисленные преимущества перед наземными методами. Нет необходимости в обеспечении видимости между пунктами, а, следовательно, нет необходимости в постройке наружных знаков: сигналов и пирамид. Выполнять измерения можно практически в любую погоду. Сессия наблюдений на пункте спутниковой сети длится полтора-два часа, тогда, как наблюдения на пункте триангуляции, трилатерации или высокоточной полигонометрии длились несколько суток. Геодезическая сеть, созданная спутниковым методом, получается более точной в сравнении с геодезической сетью, созданной каким-либо наземным методом. Реальная спутниковая сеть показана на рисунке 3.1. На рисунке 3.21 приведена идеализированная схема спутниковой геодезической сети. Обозначения на этом рисунке те же, что и на рисунке 3.8. Одним из принципиальных отличий спутниковой сети от сети, созданной наземным методом, является то, что связаны здесь не те пункты, между которыми существует видимость, а те пункты, на которых наблюдения выполнены одновременно. Например, как показано на рисунке 3.21, верхний средний геодезический пункт связан со всеми остальными пунктами спутниковой геодезической сети, кроме двух центральных пунктов.

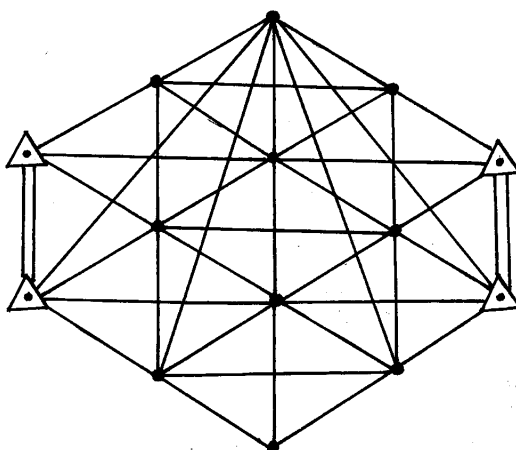


Рисунок 3.21. Спутниковая геодезическая сеть

Существенным признаком и принципиальным достоинством спутникового метода является то, что из результатов измерений получают не расстояния или углы между пунктами, а, как показано на рисунке 3.20, вектор \vec{D} , соединяющий центры этих пунктов:

$$\vec{D} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} . \quad (3.1)$$

В этом выражении ΔX , ΔY , ΔZ – разности координат пунктов. При необходимости, расстояние D между этими пунктами, используя полученные значения разностей координат ΔX , ΔY , ΔZ и формулу (2.1), вычислить можно. Из выражения (3.1) следует, что получают именно разности координат пунктов геодезической сети, а не координаты этих пунктов. В качестве исходных пунктов для геодезической сети, созданной спутниковым методом, используют, как написано, пункты глобальной геодезической сети, созданной сочетанием двух методов: метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) и метода лазерной локации искусственных спутников Земли.

3.4. Геодезическая сеть Российской Федерации

Государственная геодезическая сеть Российской Федерации – ГГС РФ – в настоящее время находится на стадии создания и совершенствования. ГГС РФ, также, как и ГГС СССР формируют по принципу «перехода от общего к частному». ГГС РФ включает фундаментальную астрономо – геодезическую сеть (ФАГС), высокоточную геодезическую сеть (ВАГС) и спутниковую геодезическую сеть 1 класса (СГС-1). На рисунке 3.22 показано расположение пунктов ФАГС и ВАГС [gostrf.ru].

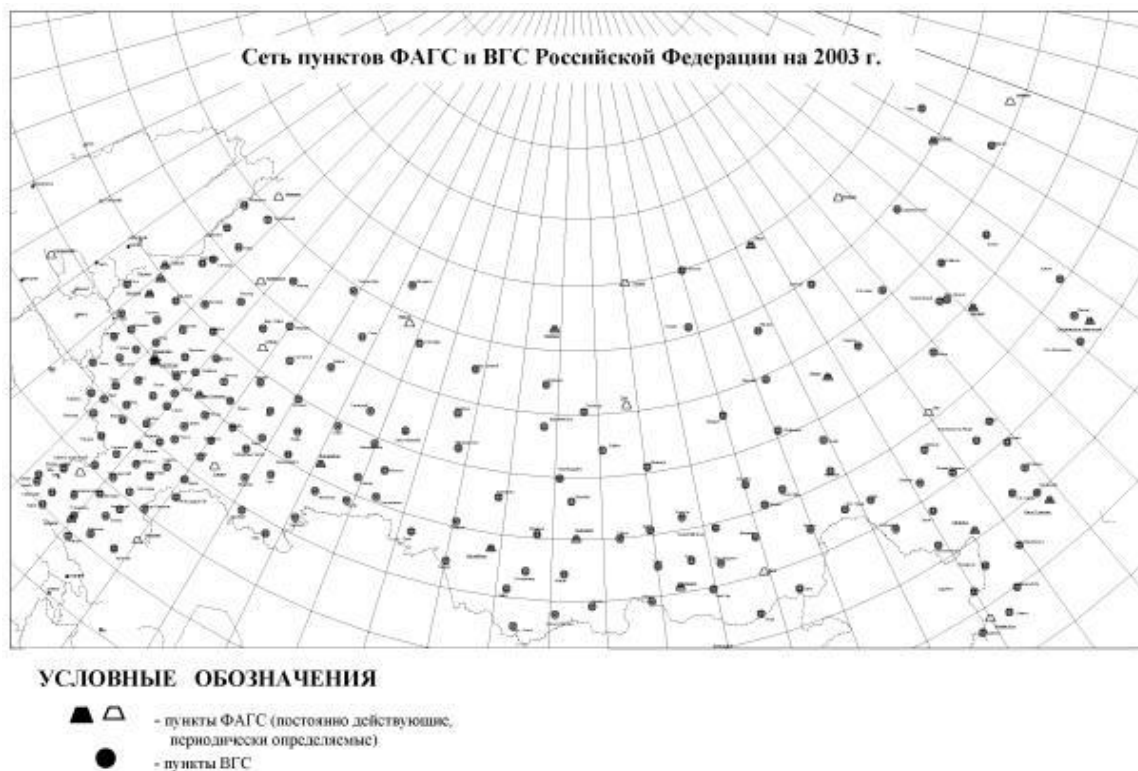


Рисунок 3.22. Пункты ФАГС и ВАГС ГГС Российской Федерации

Координаты пунктов ГГС РФ определены в системе координат СК-95, принятой для территории нашей страны в 1995 году. Эта система координат связана с общемировой системой координат. Для создания ФАГС используют метод радиointерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) и метод лазерной локации искусственных спутников Земли. Сети остальных классов создают с использованием систем глобального спутникового позиционирования.

Создают, начиная с густонаселённых и развитых в производственном отношении областей страны, локальные сети *постоянно действующих референционных станций*. Каждая такая станция содержит комплекс аппаратуры, включающий спутниковый приёмник. Результаты наблюдений – необработанные (сырые) данные – raw data – и иную информацию передают по каналам связи: эфир, INTERNET, мобильная связь. Наблюдатель, установивший роверный спутниковый приёмник на определяемом пункте в радиусе нескольких десятков километров от постоянно действующей референционной станции и имеющий возможность принимать сигнал этой станции, может в течение нескольких десятков минут определить координаты пункта. Другими словами, у наблюдателя нет необходимости создавать, как это показано на рисунке 3.20, свою референционную станцию. На рисунке 3.23 показана, для примера, сеть постоянно действующих на территории Бурятии референционных станций [vt-inform.ru].



Рисунок 3.23. Сеть постоянно действующих на территории Бурятии референчных станций

ГГС РФ включает, как написано, также и пункты созданной ранее ГГС СССР. Высотную (нивелирную) и гравиметрическую сети продолжают развивать и совершенствовать одновременно с развитием и совершенствованием ГГС Российской Федерации.

4. Геодезическая метрология

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Бурдун], [Галазин], [Одуан], [Спиридонов], [Тюрин] и [Шануров].

В геодезии вообще и в высшей геодезии в частности измеряют угловые и линейные величины. Измерение - это процедура сравнения неизвестной величины с *эталоном* этой величины или с копией (представителем) эталона. Результатом измерения является получение с требуемой точностью численного значения измеряемой величины. Из данного определения понятия измерения следует то, что специалист, выполняющий это измерение, должен иметь в своем распоряжении эталон или копию эталона - *рабочую меру*. Специалист должен иметь также прибор, позволяющий выполнить измерение (сравнение) с требуемой точностью, например теодолит, инварную проволоку, светодальномер. Необходима официально утверждённая методика измерения. Необходима официально утверждённая методика обработки результатов измерения. И, наконец, необходимо подготовить специалиста, который имеет соответствующую квалификацию и способен практически реализовать процедуру измерения.

Эталоном при измерении угла является полный угол (в 2π радиан, в 360 градусов или в 400 град). Эталон угла является *естественным эталоном*. Функции представителей этого эталона, функции *рабочего эталона*, функции *рабочих мер* выполняют угловые расстояния между делениями лимба теодолита.

Эталон, который используют для измерения расстояний, не является естественным, но напротив, является *условным* (conventional). В 1872 году Международная Метрическая Комиссия приняла решение об использовании метра как исходной меры длины. В

соответствии с этим решением был изготовлен 31 экземпляр эталона метра. Фотография эталона метра представлена на рисунке 4.1 [elementy.ru].



Рисунок 4.1. Платино - иридиевый эталон метра.

Эталон метра представляет собой жезл, имеющий Х-образное сечение, и изготовленный из сплава платины (90%) и иридия (10%). Вблизи концов жезла нанесли по три штриха. Постановлением 1 Генеральной конференции по мерам и весам в 1889 году расстояние между средними из трёх штрихов при температуре жезла в ноль градусов Цельсия принято в качестве *Международного прототипа метра*. Международный прототип метра и две его контрольные копии хранятся во французском городе Севр в Международном Бюро Мер и Весов. В Научно-исследовательском институте имени Д.И. Менделеева (НИИМ) в Санкт-Петербурге хранятся две копии №11 и №28 Международного прототипа метра. При введении в России в 1918 году метрической системы мер *государственным эталоном метра* была признана копия №28. Таким образом копия №28 стала *Национальным прототипом метра*. Длину национального прототипа метра передают на рабочие меры по *метрологической цепочке*. Метрологическая цепочка имеет следующий вид. С национальным прототипом метра сравнивают *представителей* этого национального прототипа. В метрологической лаборатории Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) имеется оптико-механический компаратор, фотография которого приведена на рисунке 4.2 [www.migaik.ru].



Рисунок 4.2. Оптико - механический компаратор МИИГАиК.

Неотъемлемой частью этого компаратора является трехметровый жезл, изготовленный из инвара - сплава металлов, обладающего близким к нулю коэффициентом температурного расширения. Номинальная длина компаратора, то есть, расстояние между крайними микроскоп-микрометрами, составляет 24 метра. Реальную длину этого компаратора определяют относительно инварного жезла. Длину самого жезла (уравнение

жезла) определяют относительно представителей национального эталона метра. Для этого инварный жезл возят из Москвы в Санкт-Петербург, в НИИМ и обратно. Относительно длины оптико-механического компаратора МИИГАиК, определенной из сравнения с инварным жезлом, определяют реальные длины (уравнения) 24-метровых инварных проволок (прибор Едерина). С помощью этих проволок определяют длину полевых базисов. На этих базисах исследуют светодальномеры и проводят их метрологическую аттестацию. Роль рабочей меры, с которой сравнивают измеряемую аттестованным светодальномером дистанцию, выполняет длина волны модуляции светового излучения светодальномера.

Национальный прототип метра можно воспроизвести с относительной ошибкой не менее 10^{-7} , что в абсолютной мере составляет 0,1 микрометра. Такая ошибка при современном уровне точности геодезических измерений слишком велика. В 1960 году XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла принципиально новое определение эталона метра. В соответствии с этим новым определением, метр - это длина, равная 1650763,73 длин волн в вакууме светового излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $2d_6$ атома криптона-86. Появилась возможность воспроизвести такой эталон метра во многих лабораториях. В контролируемых и особо оговоренных условиях единицу длины - метр - воспроизводят с относительной ошибкой $3 \cdot 10^{-8}$.

Расстояние D, измеренное электронным дальномером, вычисляют по формуле:

$$D = \frac{V \cdot \tau_{2D}}{2} . \quad (4.1)$$

Здесь τ_{2D} – время прохождения светом измеряемой дистанции; V – скорость, с которой электромагнитная волна распространяется в воздушной среде:

$$V = \frac{C}{n} . \quad (4.2)$$

В этой формуле: C - это скорость света в вакууме; n – показатель преломления воздуха. Из формул (4.1) и (4.2) следует, что результаты измерений, выполненных наземными светодальномерами, спутниковыми светодальномерами, а также и приёмниками систем глобального спутникового позиционирования, получают, используя значение скорости C света в вакууме в качестве масштабного коэффициента, то есть, в качестве *вторичного эталона*. Из формулы (4.1) также следует, что величина τ_{2D} является величиной *измеряемой* и для её получения необходим *эталон секунды*, то есть, эталон интервала времени. Эталон секунды задают, используя *цезиевые стандарты частоты и времени*. В современном определении секунда - это интервал времени, равный 9192631770 периодам колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия -133 при отсутствии возмущений внешними полями. Цезиевые стандарты частоты и времени фиксируют *атомную секунду* с относительной ошибкой $2 \cdot 10^{-13}$. В практике геодезических измерений кроме цезиевого стандарта используют *водородные стандарты частоты и времени*, так называемые Н-мазеры. Их работа характеризуется относительной ошибкой 10^{-14} . Водородные стандарты частоты и времени входят в состав аппаратуры ГЛОНАСС и GPS Navstar, а также в состав аппаратуры радиотелескопов, работающих в режиме радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой - РСДБ.

На основе эталона метра и на основе эталона секунды было определено значение *скорости распространения света* (скорости распространения электромагнитных волн) в вакууме $C = 299792458$ метров в секунду. Этому значению приписали относительную ошибку $3 \cdot 10^{-8}$, равную относительной ошибке фиксации эталона метра. Таким образом,

значение *вторичного эталона* скорости C света в вакууме фиксировано с относительной ошибкой, которая почти в сто тысяч раз больше относительной ошибки, с которой фиксировано значение *первичного эталона* секунды.

Чтобы преодолеть это несоответствие XVII Генеральная конференция мер и весов в октябре 1983 года приняла решение о том, что значение скорости света в вакууме $C = 299792458$ метров в секунду становится *величиной безошибочной*. Это означает, что эталон скорости света превратился из вторичного эталона в первичный эталон и первичными эталонами стали уже не метр и секунда, а скорость C света в вакууме и секунда. Метр же превратился из первичного эталона во вторичный эталон. В современном определении метр - это расстояние, которое свет проходит в вакууме за $1/299792458$ секунды. Именно это значение метра используют для задания масштаба геодезических сетей, создаваемых с использованием электронных дальномеров, спутниковых систем и вообще *методов космической геодезии*. Такое определение метра называют *пролётным*. Изменение определения метра не изменяет длины эталона метра в принципе. $1650763,73$ длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $2d_5$ атома криптона - 86 согласованы с расстоянием между штрихами, нанесенными на жезл, изготовленный из сплава платины и иридия. Пролетное определение метра согласовано с двумя предшествующими определениями метра. При каждом новом определении метра его фиксируют со все возрастающей точностью.

5. Физический аспект высшей геодезии

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Красовский, 1942], [Молоденский], [Огородова, 1978], [Огородова, 2006], [Пеллинен], [Torpe], [Юзефович], [Burša] и [Moritz].

Область высшей геодезии, в которой изучают поле силы тяжести Земли и учитывают влияние этого поля на результаты геодезических измерений, называют *физической геодезией*. Высшая геодезия начинается там, где начинают учёт структуры поля силы тяжести.

5.1. Характеристики поля силы тяжести Земли

В каждом пункте, расположенном на поверхности Земли, и в каждой точке окружающего Землю пространства существует *сила притяжения Земли, сила гравитации*, которую представляют в виде *вектора \vec{F}* . В этом же пункте существует *вектор \vec{F}_c центробежной силы*, порожденной суточным вращением Земли. Векторная сумма этих двух сил представляет собой *вектор \vec{G} силы тяжести*. В каждом пункте существует *вектор \vec{g} ускорения силы тяжести Земли*, а значит, существует и *модуль g вектора ускорения силы тяжести*. Именно значение модуля вектора ускорения силы тяжести определяют с помощью гравиметров. Вектор \vec{g} называют также *напряженностью поля силы тяжести* и *ускорением свободного падения*. В каждом пункте существует значение *потенциала W силы тяжести Земли*. Дадим понятие *разности потенциалов $\Delta W_{AB} = W_A - W_B$* в двух пунктах А и В. Для начала будем считать, что разность высот пункта В и пункта А мала и равна элементарному превышению dh . Тогда элементарная *работа* по перемещению объекта, обладающего единичной массой, против силы тяжести из пункта А в пункт В, равна:

$$dW = gdh \quad (5.1)$$

В реальности превышение между пунктами А и В конечно. Поэтому работу по перемещению объекта, обладающего единичной массой, против силы тяжести из пункта А в пункт В, то есть разность ΔW_{AB} потенциалов силы тяжести определяет следующая формула:

$$\Delta W_{AB} = W_A - W_B = \int_A^B gdh \quad (5.2)$$

Ситуацию иллюстрирует рисунок 5.1.

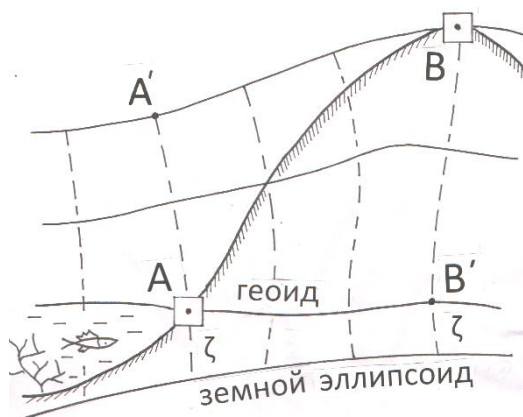


Рисунок 5.1. Эквипотенциальные поверхности и силовые линии поля силы тяжести

В формуле (5.2) интеграл вычисляют по траектории перемещения от пункта А до пункта В; dh — элементарное превышение; g - текущее значение модуля вектора ускорения силы тяжести на этом элементарном превышении. Разность $\Delta W_{AB} = W_A - W_B$ потенциалов называют *геопотенциальной величиной*. Потенциал W силы тяжести в пункте - это работа против поля силы тяжести, которую надо совершить для перемещения единичной точечной массы из этого пункта в бесконечность.

Вектор \vec{G} силы тяжести, и/или вектор \vec{g} ускорения силы тяжести, модуль g этого вектора, а также потенциал W силы тяжести являются *характеристиками поля силы тяжести* в данном пункте. Для полного описания поля силы тяжести изучают распределение этих характеристик в пространстве вокруг Земли и на поверхности Земли. Это распределение описывают, используя понятие *эквипотенциальной поверхности* и понятие *силовой линии* силы тяжести. Обратимся к рисунку 5.1. *Эквипотенциальная поверхность* - это поверхность, на которой потенциал поля силы тяжести Земли постоянен. На рисунке 5.1 эти поверхности изображены сплошными кривыми линиями. Наглядным представлением эквипотенциальной поверхности является спокойная поверхность воды, поэтому эквипотенциальную поверхность еще называют *уровенной поверхностью*. Существует бесконечное множество эквипотенциальных поверхностей. Эти поверхности гладкие - дифференцируемые в любой точке, и не соприкасаются друг с другом. Эти поверхности не параллельны. *Силовая линия* силы тяжести - это кривая, которая в каждой своей точке ортогональна эквипотенциальным поверхностям. На рисунке 5.1 эти линии изображены в виде штриховых линий. Вектор силы тяжести в любой точке направлен по касательной к силовой линии к центру Земли. Направление вектора силы тяжести называют также *направлением отвесной линии*. Отвесная линия является касательной к силовой линии в точке наблюдения. Именно это положение занимает ось вращения алидады теодолита (тахеометра), установленного и нивелированного на пункте. И именно этому направлению перпендикулярна визирная ось нивелира, установленного в рабочее положение. При перемещении по эквипотенциальной поверхности работу против силы тяжести не совершают. Плоскость, касательная к эквипотенциальной поверхности в данном пункте, представляет собой плоскость астрономического горизонта пункта. Направление вдоль отвесной линии вверх называют направлением в *астрономический зенит* пункта. Направление вдоль отвесной линии вниз называют направлением в *надир* пункта.

5.2. Геоид

Строгое в математическом смысле *определение* геоида таково. *Геоид* - это эквипотенциальная поверхность, содержащая пункт, принятый за начало счета высот. В классических учебниках по высшей геодезии дано следующее *понятие* геоида. Геоид - это поверхность, совпадающая с невозмущенной поверхностью Мирового Океана и мысленно продолженная под материками. Высоту пункта над поверхностью геоида называют *ортометрической высотой* этого пункта. В Российской Федерации исходным пунктом начала счета высот является нуль-пункт Кронштадтского футштока. Футшток представляет собой рейку, укрепленную в одном из устоев Синего моста, перекинутого через сообщаемый с Финским заливом Обводной канал в городе Кронштадт. Кронштадт расположен на острове Котлин. Фотография Синего моста приведена на рисунке 5.2 [14000.ru].



Рисунок 5.2. Синий мост в Кронштадте

В правой нижней части фотографии виден устой, в котором укреплен футшток. Фотография футштока приведена на рисунке 5.3 [lovivov.livejournal.com].



Рисунок 5.3. Футшток

Нуль-пункт футштока совмещён с горизонтальной чертой на укреплённой рядом металлической табличке. Эта черта соответствует среднему уровню воды Финского залива Балтийского моря по результатам наблюдений 1825-1839 годов. Фотография таблички с чертой дана на рисунке 5.4 [nash-kronshtadt.ru].



Рисунок 5.4. Табличка с чертой



Рисунок 5.5. Павильон мареографа

На рисунке 5.5 приведена фотография расположенного близ Синего моста павильона, в котором установлен изготовленный в 1870 году мареограф - прибор для регистрации уровня воды в Финском заливе.

Поскольку начало счёта высот на территории Советского Союза и на территории Российской Федерации связано с уровнем Балтийского моря, говорят и пишут, что на территории нашей страны используют Балтийскую систему высот. Начало счёта высот хранят реперы, в том числе и фундаментальный репер, расположенные недалеко от Кронштадского футштока.

5.3. Превышение и высота

Высота пункта – это одна из трёх его координат, но среди остальных координат она занимает особое место. В учебнике [Огородова, 2006] написано: «Понятие высоты, несмотря на кажущуюся очевидность, является одним из наиболее сложных и тонких понятий геодезии». Как определить разность высот двух пунктов? Топограф ответит, и правильно ответит, что надо проложить между этими пунктами нивелирный ход, а затем вычислить сумму $\sum h$ измеренных превышений. В результате получают *разность высот*, которую называют *измеренным превышением*. Если один из этих пунктов является исходным, то есть, если этот пункт имеет приписанное ему (каталожное) значение высоты $H_{исх}$, то в результате вычисляют высоту $H_{опр}$ второго, определяемого пункта:

$$H_{опр} = H_{исх} + \sum h . \quad (5.3)$$

Полученное таким образом значение $H_{опр}$ высоты определяемого пункта B называют *измеренной высотой* этого пункта.

При выполнении нивелирования визирную ось нивелира устанавливают по касательной к эквипотенциальной поверхности в пункте, где нивелир установлен. Следовательно, все написанное относительно простого суммирования нивелирных превышений верно, если можно пренебречь непараллельностью эквипотенциальных (уровенных) поверхностей поля силы тяжести Земли, то есть непараллельностью плоскостей горизонта в разных точках установки нивелира.

Если представить себе, смотри рисунок 5.1, что нивелирный ход от точки A до точки B проложен по линии $AA'B$ и по линии $AB'B$, то результаты вычисления измеренной высоты точки B над точкой A получатся разными. Причиной является неравенство длин отрезков AA' и $B'B$, что, в свою очередь, вызвано именно непараллельностью эквипотенциальных поверхностей поля силы тяжести. Таким образом, результат вычисления высоты пункта, полученной суммированием измеренных превышений зависит от того, по какому пути проложен нивелирный ход. Нетрудно понять, что сумма измеренных в полигоне превышений, то есть теоретическая невязка в замкнутом нивелирном ходе не будет равна нулю. Этим эффектом можно пренебречь в нивелирных сетях низших классов, то есть в тех случаях, когда длины ходов ограничены несколькими километрами, а ошибки определения превышений, составляющие несколько миллиметров, не играют особой роли.

В высшей геодезии длины нивелирных ходов составляют тысячи километров. Инструментальные же ошибки при выполнении высокоточного и точного нивелирования исчисляются в долях миллиметра. Поэтому в высшей геодезии кривизну эквипотенциальных поверхностей учитывают. Для этого, дополнительно используя данные гравиметрии, в измеренные превышения вводят поправки и, тем самым, от измеренных высот переходят к одной из *систем высот*.

5.4. Системы высот

Система высот – это способ вычисления высот пунктов (реперов) относительно исходного пункта А, смотри рисунок 5.1, принятого за начало счёта высот. К системе высот предъявляют следующие требования. 1. Результат вычисления высоты определяемого пункта не должен теоретически зависеть от трассы нивелирования – от *пути интегрирования*. 2. Поправки за переход от измеренных нивелирных превышений к системе высот можно вычислить по результатам измерений, выполненных только на земной поверхности. Не должно возникать необходимости в измерении ускорения силы тяжести в толще Земли под местом установки нивелира или в воздухе над нивелиром. 3. Поправки за переход от измеренных нивелирных превышений к системе высот должны быть малы. Эти поправки должны быть малы настолько, чтобы их было необходимо вводить только в результаты точного и высокоточного нивелирования, то есть в результаты нивелирования I и II классов. При выполнении же нивелирования низших классов эти поправки не вводят. 4. Высоты (отметки) точек, расположенных на одной эквипотенциальной (уровенной) поверхности должны быть равны.

В качестве меры высоты пункта В над поверхностью геоида, то есть над точкой А, принятой за начало счета высот (смотри рисунок 5.1) можно было бы использовать разность потенциалов ΔW_{AB} поля силы тяжести в точках А и В, смотри формулу (5.2). Другими словами, в качестве системы высот можно было бы использовать систему геопотенциальных величин. Такая система высот удовлетворяла бы, по крайней мере, первому, самому главному требованию к системе высот. Однако такой подход имел бы, в практическом смысле, существенный недостаток. Такое «превышение» имеет размерность, выраженную в единицах работы (энергии). Геодезистам же и пользователям геодезической продукции необходимо, чтобы превышения между пунктами и высоты пунктов были бы выражены в линейной мере, то есть в метрах и в долях метра. Чтобы перевести геопотенциальную величину ΔW_{AB} , смотри формулу (5.2), в превышение, выраженное в линейной мере, эту геопотенциальную величину необходимо разделить на некую масштабирующую величину. Эта величина должна иметь размерность ускорения поля силы тяжести. От того, какая именно величина использована для такого масштабирования и зависит, какая именно система высот создана (сконструирована).

Исторически первой была создана и стала использоваться *ортометрическая* система высот или система *ортометрических высот*. Ортометрическая высота пункта – это высота пункта над поверхностью геоида. Формула для ортометрической высоты H_B^g точки В имеет вид:

$$H_B^g = \frac{1}{g_m} \int_A^B g dh = \frac{1}{g_m} \Delta W_{AB} . \quad (5.4)$$

В этой формуле - g_m среднеинтегральное значение модуля вектора ускорения силы тяжести. Это значение вычисляют по силовой линии поля реальной силы тяжести от точки В' до точки В, смотрит рисунок 5.1. Другими словами, ортометрическую высоту вычисляют, масштабируя геопотенциальную величину значением g_m . Отсчётной поверхностью в системе ортометрических высот является геоид.

В ортометрической системе высот и в любой иной системе высот используют геопотенциальную величину, для определения которой, помимо выполнения геометрического нивелирования, необходимо измерять ускорение силы тяжести. *Абсолютное значение* ускорения силы тяжести измеряют, используя *баллистические*

гравиметры. Такие гравиметры ещё называют *абсолютными гравиметрами*. Фотография баллистического гравиметра приведена на рисунке 5.6 [drillings.ru].

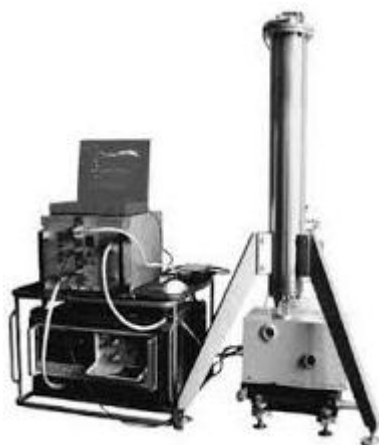


Рисунок 5.6. Баллистический гравиметр

Баллистический гравиметр – это дорогой и сложный в эксплуатации прибор. По большей части баллистические гравиметры используют при работе в стационарных условиях в геофизических обсерваториях. На производстве основной объём измерений выполняют с использованием *статических гравиметров*, которые позволяют измерять не абсолютное значение ускорения силы тяжести, а *разность ускорений силы тяжести* в пунктах геодезической сети. Статические гравиметры в сравнении с баллистическим гравиметром гораздо более мобильны. Фотография статического гравиметра, чувствительная система которого изготовлена из плавленого кварца, приведена на рисунке 5.7 [vts.mybb.ru].



Рисунок 5.7. Статический гравиметр

Система ортометрических высот имеет по крайней мере один существенный недостаток – она не удовлетворяет второму из сформулированных в начале этого подраздела требований. Действительно, для определения g_m , смотри формулу (5.4), необходимо знать значения ускорения силы тяжести на отрезке между точками В и В', расположенном в толще Земли. Распределение силы тяжести в толще Земли зависит от распределения плотности вещества в этой толще. Это распределение можно изучить, пробуравив скважину, но бурить скважины от поверхности Земли до геоида рядом с каждым репером невозможно. Поправки за переход к системе ортометрических высот вычисляли и вычисляют на основе тех или иных предположений о внутреннем строении земной коры, подстилающей район, где прокладывают нивелирный ход. Вычисленные в результате

ортометрические высоты реперов принципиально не являются строгими. Тем не менее, систему ортометрических высот в некоторых странах используют. В том числе, судя по публикациям американских геодезистов, используют и в США. На территории нашей страны используют свободную от указанного недостатка систему *нормальных высот*. Система нормальных высот описана далее, пока же ненадолго вернёмся к системе ортометрических высот.

На рисунке 5.1 показана часть поверхности *земного эллипсоида*. Расстояние ξ - это высота поверхности геоида над поверхностью эллипсоида. Геодезическая высота пункта Н и его ортометрическая высота H^g связаны выражением:

$$H = H^g + \xi . \quad (5.5)$$

Система ортометрических высот - это система высот в поле реальной силы тяжести. Ортометрические высоты пунктов имеют физический смысл. Геодезическая же высота пункта имеет исключительно геометрический смысл. Отсчётной поверхностью в системе геодезических высот является земной (общеземной) эллипсоид. Помимо системы ортометрических высот существуют еще две системы высот, которые носят физический характер – это упомянутая система нормальных высот и *система динамических высот*. Прежде, чем описывать систему нормальных высот, необходимо дать понятие о *Нормальной Земле*.

Поверхность Нормальной Земли ограничена поверхностью *общеземного эллипсоида*, а масса её равна массе реальной Земли включая атмосферу. Существует понятие *нормальной силы тяжести*, модуль которой обозначают γ . Существует понятие *поля нормальной силы тяжести*. Существует понятие *потенциала U поля нормальной силы тяжести*. Существуют понятие *эквипотенциальных поверхностей поля нормальной силы тяжести* и понятие *силовых линий поля нормальной силы тяжести*.

Формула для *нормальной высоты* H_B^Y точки В имеет вид:

$$H_B^Y = \frac{1}{\gamma_m} \int_A^B g dh = \frac{1}{\gamma_m} \Delta W_{AB} . \quad (5.6)$$

В этой формуле γ_m - среднеинтегральное значение модуля вектора ускорения нормальной силы тяжести на отрезке силовой линии поля нормальной силы тяжести. Этот отрезок расположен между эквипотенциальными поверхностями нормального поля силы тяжести, содержащими точку А и точку В. Нормальную силу тяжести γ нельзя измерить, но зато её можно вычислить. Значение модуля вектора ускорения нормальной силы тяжести в данном пункте зависит только от геодезической широты и геодезической высоты этого пункта. Поэтому значение γ_m вычисляют, не используя никаких предположений о распределении плотности вещества и силы тяжести в земной коре, а, следовательно, значение нормальной высоты пункта В также вычисляют строго. Именно по этой причине на территории Советского Союза и, в частности, на территории Российской Федерации, использована разработанная профессором кафедры высшей геодезии МИИГАиК Михаилом Сергеевичем Молоденским система нормальных высот. Таким образом, на территории нашей страны используют систему нормальных высот, началом счёта в которой является нуль-пункт Кронштадского футштока. В этом – суть Балтийской системы высот.

Отсчётной поверхностью в системе нормальных высот является поверхность *квазигеоида*. На акватории Мирового Океана поверхности квазигеоида и геоида

совпадают, а на материках расстояния между ними исчисляются сантиметрами. Лишь в горных районах эти расстояния достигают величин в несколько дециметров. Из-за того, что поверхности геоида и квазигеоида расходятся столь незначительно, при выполнении глобальных исследований геоид и квазигеоид не различают и существует только понятие «глобальный геоид». В частности пишут, что поверхность общеземного эллипсоида подбирают (подобрана) именно под поверхность глобального геоида.

Высоту квазигеоида над эллипсоидом, также, как и в случае ортометрических высот, называют *аномалией высоты* и, также, как и в случае ортометрических высот, обозначают буквой ξ . Нормальная высота точки связана с геодезической высотой этой точки формулой, имеющей тот же вид, что и формула (5.5):

$$H = H^Y + \xi \quad (5.7)$$

Только численное значение ξ будет другим, отличающимся от значения ξ для ортометрической высоты.

Ни в системе ортометрических высот, ни в системе нормальных высот не удовлетворяется четвёртое из сформулированных в начале этого подраздела требований к системе высот. В этих системах высот отметки точек одной эквипотенциальной (уровенной) поверхности теоретически не являются одинаковыми. Этому требованию удовлетворяет система *динамических высот*.

Формула для *динамической высоты* $H_B^{\text{дин}}$ точки В имеет вид:

$$H_B^{\text{дин}} = \frac{1}{g_{\text{ср}}} \int_A^B g dh = \frac{1}{g_{\text{ср}}} \Delta W_{AB} \quad (5.8)$$

В этой формуле $g_{\text{ср}}$ - некоторое среднее значение модуля вектора ускорения силы тяжести, условно принятое для конкретного участка или объекта, на котором выполняют геодезические работы. Значение $g_{\text{ср}}$ принимают единым для всех реперов, расположенных на объекте. Отметки всех точек одной и той же эквипотенциальной поверхности, выраженные в этой системе высот, одинаковы. Поэтому систему динамических высот используют при создании и эксплуатации гидротехнических сооружений. Вообще, эту систему высот можно использовать только при выполнении геодезических работ на локальных участках и объектах. Попытка использовать систему динамических высот для территории страны привела бы к тому, что поправки за переход к этой системе высот были бы велики и достигали бы нескольких дециметров. Другими словами, система динамических высот не удовлетворяет третьему требованию из сформулированных в начале этого подраздела. Понятие отсчётной поверхности в системе динамических высот, также, как и в системе измеренных высот, не существует.

Подведём некоторый итог написанному в этом разделе. Система ортометрических высот удовлетворяет требованиям 1 и 3 из четырёх требований, предъявленных к системе высот. Система нормальных высот удовлетворяет требованиям 1, 2 и 3. Система динамических высот удовлетворяет требованиям 1, 2 и 4. И ни одна из рассмотренных систем высот не удовлетворяет всем четырём требованиям. В общем смысле это означает, что сформулированные требования несовместимы. Таким образом, специалист в области высшей геодезии обязан уметь выбирать конкретную систему высот, наиболее подходящую для решения стоящей перед ним задачи.

6. Земной эллипсоид

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Красовский, 1942], [Морозов], [Огородова, 1978], [Пеллинен], [Торге] и [Юзефович].

Геоид представляет собой сложную в математическом смысле поверхность. Земной эллипсоид - это гораздо более простая поверхность. Эллипсоид получают вращением эллипса вокруг его малой оси. Ситуация представлена на рисунке 6.1.

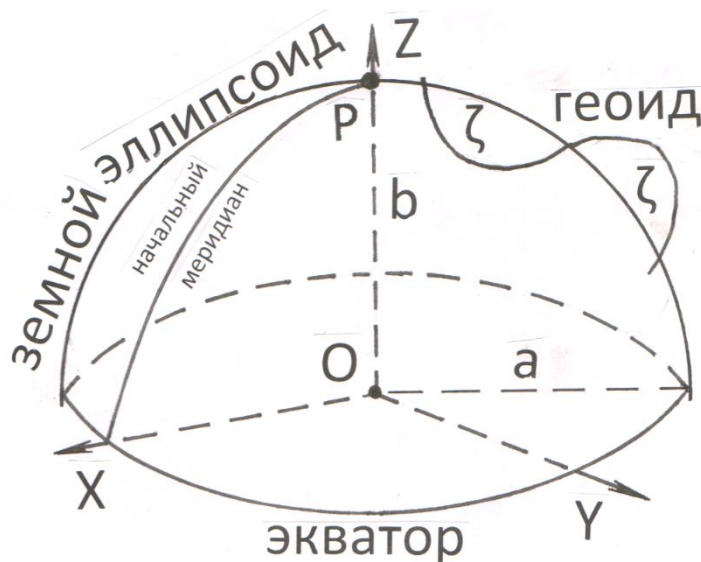


Рисунок 6.1. Геоид и земной эллипсоид.

Точка О – центр эллипсоида; точка Р - северный полюс; отрезки а и b - соответственно *большая* и *малая полуоси* земного эллипсоида. Плоскость, в которой лежит большая полуось а эллипсоида перпендикулярна полуоси b и содержит центр эллипсоида О; эту плоскость называют плоскостью геодезического экватора или просто экватором. Ось Z совпадает с малой полуосью b и содержит точку Р северного полюса. Ось X представляет собой линию, по которой плоскость геодезического экватора пересекается с плоскостью условно выбранного начального меридиана. Меридиан - это плоскость, содержащая малую полуось b и, следовательно, ось Z. Ось Y, также, как ось X, лежит в плоскости геодезического экватора и дополняет однозначно связанную с земным эллипсоидом геодезическую прямоугольную (декартову) трёхмерную систему координат X, Y, Z до правой, смотри рисунок 6.1.

Эллипсоид сжат с полюсов. Величина сжатия или просто *сжатие* α эллипсоида определяется формулой:

$$\alpha = \frac{a-b}{a} . \quad (6.1)$$

Для характеристики сжатия земного эллипсоида используют также *эксцентриситет* e эллипсоида:

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} . \quad (6.2)$$

Значения параметров земного эллипсоида, то есть а, b, α и e, а также расположение земного эллипсоида в теле Земли подбирают таким образом, чтобы поверхность земного эллипсоида наиболее близко подходила к поверхности геоида. На рисунке 6.1 изображены отклонения ζ поверхности земного эллипсоида от поверхности геоида, или наоборот,

отклонения поверхности геоида от поверхности земного эллипсоида. Критерием близости поверхности земного эллипсоида к поверхности геоида служит следующий:

$$\sum \zeta^2 = [\zeta^2] = \min . \quad (6.3)$$

6.1. Общеземной эллипсоид, Нормальная Земля

Решая глобальные задачи высшей геодезии, критерий (6.3) выполняют для пунктов глобальной геодезической сети, расположенной по всей поверхности Земли. Подобранный таким образом земной эллипсоид называют *общеземным эллипсоидом*. Выполнение условия (6.3) по всей поверхности Земли необходимо, но недостаточно для того, чтобы земной эллипсоид имел бы право называться общеземным эллипсоидом. Помимо этого необходимо, чтобы были выполнены еще несколько условий или требований, предъявляемых к общеземному эллипсоиду. Центр общеземного эллипсоида должен совпадать с центром масс Земли. Малая ось общеземного эллипсоида должна совпадать с положением оси суточного вращения Земли, условно принятым на исходную фундаментальную эпоху. Объем общеземного эллипсоида должен быть равен объему геоида. Скорость суточного вращения общеземного эллипсоида должна быть равна скорости суточного вращения Земли. Земной эллипсоид используют для задания геодезической прямоугольной и геодезической эллипсоидальной систем координат.

Существует несколько практических реализаций общеземного эллипсоида. В спутниковой системе глобального позиционирования GPS Navstar используют систему координат WGS84 – World Geodetic System 1984 – Общеземная Геодезическая Система, принятая к реализации в 1984 году. В спутниковой системе глобальной навигации ГЛОНАСС используют систему координат ПЗ90 - Параметры Земли 1990 года. Числовые значения большой полуоси и сжатия соответствующих практических реализаций общеземного эллипсоида таковы:

$$\text{WGS84:} \quad a = 6378137 \text{ метров;} \quad \alpha = 1/298,257223563, \quad (6.4)$$

$$\text{ПЗ90:} \quad a = 6378136 \text{ метров;} \quad \alpha = 1/298,257839303 .$$

Наряду с числовым геометрическим понятием земного (общеземного) эллипсоида используют понятие Нормальной Земли. Нормальная Земля представляет собой общеземной эллипсоид, которому приписана масса, равная массе реальной Земли, включая массу атмосферы. Этот эллипсоид в данном случае называют *уровненным эллипсоидом*. Так его называют потому, что поверхность этого эллипсоида является *уровневой* и, следовательно, эквипотенциальной, поверхностью потенциала U нормальной силы тяжести γ . Распределение нормальной силы тяжести по поверхности *уровненного эллипсоида* и во внешнем пространстве описывает итеративная формула:

$$\gamma = \gamma_0 - 2 \frac{\gamma}{R} H . \quad (6.5)$$

В этой формуле H геодезическая высота пункта; R – средний радиус Земли; γ_0 – значение нормальной силы тяжести на поверхности *уровненного эллипсоида*, которое, в свою очередь, вычисляется по приближённой формуле:

$$\gamma_0 \approx \gamma_e (1 + \beta \sin^2 B) . \quad (6.6)$$

В этой формуле: γ_e – значение нормальной силы тяжести на экваторе Нормальной Земли; B – геодезическая широта пункта; H – геодезическая высота пункта; $\beta = 0,0053$.

6.2. Референц-эллипсоид

Референц-эллипсоид создают для решения задач геодезии и картографии на территории страны и/или группы соседствующих стран. Критерий (6.3) выполняют только на этой территории. Никаких иных требований к референц-эллипсоиду не предъявляют. Примером является референц-эллипсоид Ф.Н. Красовского.

7. Системы координат и системы времени

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Баранов], [Галазин], [Крылов, 2002], [Крылов, 2003], [Крылов, 2014], [Морозов], [Огородова, 2006], [Одуан], [Пеллинен], [Урмаев], [Шануров], [Hofmann], [Jekeli] [Mueller] и [Torge].

Совокупность системы координат и системы времени называют *системой отсчёта*. Чтобы создать геодезическую сеть, необходимо решить две связанные задачи: задать (фиксировать) систему координат и определить координаты пунктов геодезической сети в этой системе координат. Точность задания и фиксации системы координат должна соответствовать точности, с которой в данную эпоху выполняют геодезические измерения. Для решения глобальных задач высшей геодезии используют фиксированную относительно земной коры и вращающуюся вместе с Землёй *общеземную систему координат*. Для решения задач регионального и локального характера используют *региональные и локальные референциальные системы координат*, которые тоже фиксированы относительно земной коры. Для решения задач высшей геодезии (астрономо – геодезии) методами, основанными на наблюдениях небесных объектов, таких, как искусственные спутники Земли и квазары, используют *инерциальную систему координат*. Инерциальная система координат не испытывает вращения; физическое тело, на которое не действует никакая сила не испытывает в этой системе координат ускорений.

Для решения задач высшей геодезии необходимо *измерять время*. Действительно, квазары и спутники с течением времени изменяют свое положение на небесной сфере. Расстояние между объектами получают, измеряя (определяя) интервал времени, за который электромагнитная волна проходит это расстояние. Процедура измерения времени и интервалов времени, также как и процедура измерения любой другой физической величины, представляет собой сравнение измеряемой величины с некоторым стандартом (эталоном). Системы времени различают по используемому эталону и по методике сравнения времени (временного интервала) с эталоном времени. Система координат и система времени связаны. Как написано, такую совокупность называют системой отсчёта. В англоязычных источниках информации для обозначения этого понятия используют термин *reference system – референциальная система*.

7.1. Геодезическая прямоугольная система координат, связанная с положением оси вращения Земли на эпоху наблюдений

Типы используемых в геодезии земных систем координат: это *прямоугольная (декартова) геодезическая система координат* X, Y, Z и *эллипсоидальная геодезическая система координат* B, L, H . Рассмотрим прямоугольную (декартову) систему координат X, Y, Z , связанную с мгновенным положением оси вращения Земли и иллюстрируемую рисунком 7.1.



Рисунок 7.1. Земная система координат.

Начало O системы координат совпадает с центром масс Земли. Ось Z совпадает с мгновенным на эпоху наблюдений положением оси вращения Земли; положительным концом эта ось направлена в сторону севера и содержит, таким образом, точку P полюса. *Астрономический экватор* – это плоскость, перпендикулярная мгновенной оси вращения Земли (оси Z) и содержащая начало координат O . Ось X – это линия пересечения плоскости астрономического экватора с плоскостью *начального Гринвичского (Гринвичского) меридиана*. Ось Y также лежит в плоскости астрономического экватора и дополняет систему координат до правой – она направлена на восток от оси X_1 . *Мгновенная земная система координат* связана с реально существующей в пространстве осью вращения Земли. Поэтому данную систему координат можно практически реализовать. Однако мгновенная земная система имеет и существенный недостаток. Ось вращения Земли, а вместе с ней и ось Z , меняет свое положение в теле Земли с течением времени. Данный эффект проявляется в *движении полюса*. Следовательно, с течением времени меняют свое положение в теле Земли и оси X, Y . По этой причине координаты неподвижных точек земной поверхности в мгновенной системе координат с течением времени изменяются. Указанное обстоятельство приводит к тому, что мгновенная земная система координат играет роль промежуточной стадии при переходе от инерциальной системы координат к *фундаментальной земной системе координат*.

7.2. Геодезическая прямоугольная система координат, фиксированная на исходную фундаментальную эпоху

Результаты измерений и определений, полученные в разные эпохи, необходимо редуцировать в единую систему координат. Такую фиксированную на исходную фундаментальную эпоху геодезическую прямоугольную (декартову) систему координат можно иллюстрировать рисунком, аналогичным рисунку 7.1. Эту систему координат определяют следующим образом. Начало координат O совпадает с центром масс Земли. Ось Z проходит через *Международное Условное Начало* (МУН) - Conventional International Origin (CIO). МУН представляет собой среднее положение северного полюса Земли в период с 1900 по 1905 год. После введения уточняющих поправок за нутацию эта точка, как определено рекомендациями *Международной Службы Вращения Земли* - International

Earth Rotation Service (IERS), известна теперь как *Условный Земной Полюс* - Conventional Terrestrial Pole (CTP). На рисунке 7.1 точке CTP соответствует точка P. Плоскость геодезического экватора содержит начало координат системы и перпендикулярна оси Z. Ось X образована пересечением плоскости геодезического экватора и плоскости начального геодезического Гринвичского меридиана - плоскости опорного меридиана IRM – IERS Reference Meridian (IERS – International Earth Rotation and Reference Systems Service – Международная Служба Вращения Земли и Референцных Систем Координат). Ось Y дополняет систему координат до правой.

Истинный полюс совершает движение вокруг CTP по кривой, напоминающей спираль. Траектория показана на рисунке 7.2 [romantics.com.ua].

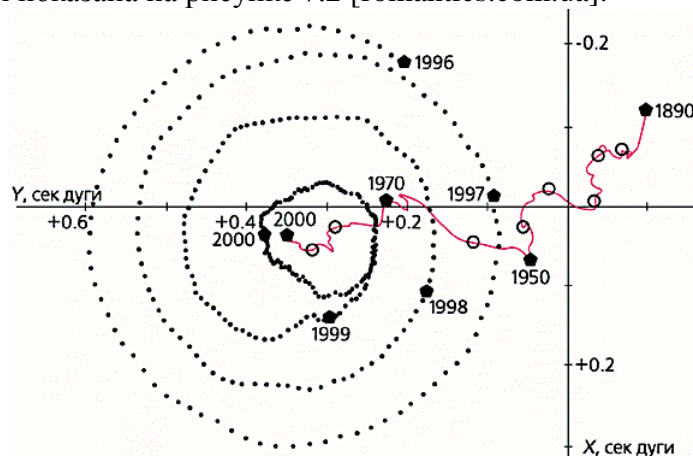


Рисунок 7.2. Траектория движения полюса Земли.

Основной причиной наличия движения полюса является несовпадение оси вращения Земли с осью ее инерции. Это движение, названное *Чандлеровским движением* - Chandler wobble, совершается с периодом около 430 суток. Местоположение мгновенного полюса относительно **СТР** представляют в виде его координат x_p и y_p . Ось x направлена вдоль нулевого Гринвичского меридиана, ось y направлена вдоль меридиана с долготой 270° . Координаты полюса определяют с ошибкой в несколько сантиметров методом *радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ)* - Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Результаты публикуют, в том числе в INTERNET. Переход от мгновенной земной системы координат к фундаментальной геодезической системе координат выполняют *вращением системы координат*.

Вообще, вращение в трёхмерном пространстве представляют, как последовательность поворотов вокруг трёх ортогональных осей прямоугольной (декартовой) системы координат. Этой процедуре поворотов соответствует матрица **R**, которая представляет собой произведение элементарных *матриц поворота* вокруг соответствующих осей координат X, Y, Z на углы ω :

$$R_1(\omega) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_1 & \sin \omega_1 \\ 0 & -\sin \omega_1 & \cos \omega_1 \end{pmatrix},$$

$$R_2(\omega) = \begin{pmatrix} \cos \omega_2 & 0 & -\sin \omega_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \omega_2 & 0 & \cos \omega_2 \end{pmatrix}, \quad (7.1)$$

$$R_3(\omega) = \begin{pmatrix} \cos \omega_3 & \sin \omega_3 & 0 \\ -\sin \omega_3 & \cos \omega_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Эти матрицы назовём элементарными матрицами вращения. Матрицу \mathbf{R} формируют как произведение всех трех элементарных матриц вращения, как произведение двух элементарных матриц вращения, либо матрица вращения может быть равна какой-либо одной из этих трех элементарных матриц вращения. Переход от геодезической системы координат на эпоху наблюдений к системе координат, фиксированной на исходную фундаментальную эпоху выполняют, используя следующую матрицу вращения:

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{R}_2(-x_p) \cdot \mathbf{R}_1(y_p) . \quad (7.2)$$

Эта формула справедлива для любых значений углов вращения. Координаты полюса, выраженные в угловой мере, представляют собой малые значения, не превышающие 0,5 секунды дуги. Для таких малых углов вращения матрицу вращения представляют в упрощенном виде:

$$\mathbf{R}_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{pmatrix} . \quad (7.3)$$

В этой формуле углы вращения выражены в радианах.

7.3. Связь между инерциальной системой координат и земной системой координат

Помимо земной системы координат в высшей геодезии используют *инерциальную систему координат*. Эта система не испытывает вращения, в том числе, не вращается вместе с Землёй; в ней справедливы законы Ньютона.

Взаимное положение двух пунктов геодезической сети, как показано на рисунке 3.20, характеризует вектор \vec{D} , соединяющий эти два пункта. Этот вектор называют *вектором базы*. Вектор базы естественным образом выражается в земной системе координат X, Y, Z , фиксированной на исходную фундаментальную эпоху:

$$\vec{D} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} . \quad (7.4)$$

Эта формула повторяет формулу (3.1). Чтобы выразить вектор \vec{D} в инерциальной (экваториальной) системе координат необходимо умножить этот вектор на матрицу вращения \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{pr}^T \cdot \mathbf{R}_n^T \cdot \mathbf{R}_s^T \cdot \mathbf{R}_p^T . \quad (7.5)$$

Здесь \mathbf{R}_{pr} – матрица прецессии; \mathbf{R}_n – матрица нутации; \mathbf{R}_s – матрица суточного вращения Земли; \mathbf{R}_p – матрица движения полюса (7.2). Каждая из этих матриц является матрицей вращения размером 3×3 и образуется, как написано, произведением матриц (7.1) в различных их комбинациях. Матрица прецессии имеет вид:

$$\mathbf{R}_{pr} = \mathbf{R}_3(-z) \cdot \mathbf{R}_2(v) \cdot \mathbf{R}_1(-\xi) . \quad (7.6)$$

Здесь аргументами являются три параметра прецессии. Геометрический смысл этих параметров и формулы для их вычисления даны в книгах по сферической астрономии и космической геодезии, например [Халхунов, 1972], [Mueller, 1969], [Jekeli, 2006]. Матрица нутации имеет вид:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{R}_1[-(\varepsilon + \Delta\varepsilon)] \cdot \mathbf{R}_3(-\Delta\psi) \cdot \mathbf{R}_1(\varepsilon) . \quad (7.7)$$

Здесь аргументами являются: ε - средний угол наклона экватора к эклиптике; $\Delta\varepsilon$ и $\Delta\psi$ – параметры нутации. Геометрический смысл этих параметров и формулы для их вычисления даны в книгах по сферической астрономии и космической геодезии. Матрица суточного вращения Земли имеет вид:

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{R}_3(S_{gr}) . \quad (7.8)$$

Здесь аргументом S_{gr} является истинное звёздное гринвичское время. Координаты полюса, вариации скорости суточного вращения Земли, а также параметры прецессии и нутации объединяют термином *параметры вращения Земли – ПВЗ*.

7.4. Референцная система координат: региональная и локальная

Содержание этого подраздела связано с содержанием подраздела 6.1. Приступая к работе на объекте, геодезист располагает каталогом координат пунктов созданной ранее геодезической сети, имеющих и сохранившихся на данном объекте. Именно этот набор координат практически реализует *референцную систему координат*.

7.5. Геодезическая эллипсоидальная система координат

Для решения ряда задач геодезии, картографии и навигации помимо прямоугольной геодезической системы координат используют *эллипсоидальную геодезическую систему координат* В, L, Н, иллюстрируемую рисунком 7.1. Необходимо прежде дать определение *геодезического вертикала* пункта. Геодезический вертикал пункта - это плоскость, которая содержит нормаль к поверхности эллипсоида в данном пункте. В любом пункте поверхности Земли существует множество вертикалов. Из всего этого множества выделяют два вертикала: *меридиан* и *первый вертикал*. *Геодезический меридиан пункта* - это плоскость, которая содержит нормаль к поверхности земного эллипсоида, опущенную из данного пункта, и малую полуось земного эллипсоида, то есть ось Z. *Первый вертикал пункта* - это плоскость, которая перпендикулярна плоскости меридиана и содержит нормаль к поверхности земного эллипсоида, опущенную из данного пункта. Плоскость меридиана пересекает поверхность земного эллипсоида и линия этого пересечения представляет собой кривую. Радиус кривизны этой кривой обозначают буквой М. Эта величина носит название: *радиус кривизны сечения поверхности земного эллипсоида плоскостью меридиана*. Плоскость первого вертикала пересекает поверхность земного эллипсоида и линия этого пересечения представляет собой кривую. Радиус кривизны этой кривой обозначают буквой N. Эта величина носит название: *радиус кривизны сечения поверхности земного эллипсоида плоскостью первого вертикала*.

Геодезическая высота Н пункта – это расстояние от этого пункта до поверхности земного эллипсоида, отсчитанное по нормали к этой поверхности. *Геодезическая широта* В пункта - это угол между нормалью к поверхности земного эллипсоида в этом пункте и плоскостью геодезического экватора. *Геодезическая долгота* L пункта - это двугранный угол между геодезическим меридианом пункта и Гринвичским геодезическим меридианом. *Геодезический азимут* А с данного пункта на другой, например, наблюдаемый пункт - это двугранный угол между геодезическим меридианом данного пункта и геодезическим вертикалом данного пункта, содержащим другой пункт.

Прямоугольные геодезические координаты X, Y, Z пункта связаны с эллипсоидальными геодезическими координатами В, L, Н того же пункта соотношениями:

$$\begin{aligned}
 X &= (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L \\
 Y &= (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L \\
 Z &= [N(1 - e^2) + H] \cdot \sin B .
 \end{aligned}
 \tag{7.9}$$

В этих формулах e - эксцентриситет эллипсоида, который определяется формулой, аналогичной (6.2): N - радиус кривизны сечения поверхности эллипсоида плоскостью первого вертикала:

$$N = \frac{a}{W} , \text{ где } W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} . \tag{7.10}$$

Радиус кривизны сечения поверхности эллипсоида плоскостью меридиана определяется формулой:

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{W^3} . \tag{7.11}$$

Существует обратное преобразование, то есть, вычисление эллипсоидальных координат B , L , H по прямоугольным координатам X , Y , Z . Формулы этого преобразования более громоздки.

7.6. Динамическое время

Движение планет и других объектов Солнечной Системы подчиняется законам *небесной механики*. Эти законы описываются системами уравнений. Уравнения содержат ряд переменных. В число этих переменных входит время. Именно это время называют *динамическим временем*. Не существует часов, которые бы шли по динамическому времени. Поэтому задача определения динамического времени сводится к определению поправок в показания реально существующих, например *атомных часов* за приведение к динамическому времени. В соответствии с теорией относительности Эйнштейна, скорость течения времени зависит от скорости перемещения системы отсчета. Удобно использовать время, связанное с какой-либо неподвижной системой отсчёта. Самая неподвижная точка Солнечной Системы - *барицентр*, то есть центр масс Солнечной системы. Динамическое время в этой точке называют *Барицентрическим Динамическим Временем* - *Barycentric Dynamical Time* - BDT или, используя французскую аббревиатуру - TDB.

Из-за эффектов теории относительности показания установленных на Земле часов, вследствие вращения Земли вокруг Солнца, испытывают относительно TDB периодические вариации с амплитудой 1,6 миллисекунды. Показания часов, установленных на спутнике, подвержены таким же вариациям. Наблюдателю, находящемуся на Земле и наблюдающему спутники Земли, удобно использовать время, связанное именно с Землей. Для описания движения спутников Земли используют *Земное Динамическое Время* - *Terrestrial Dynamical Time* - TDT. Начиная с 1991 года используют TCB - барицентрическое координированное время, TCG - геоцентрическое координированное время и TT - земное время.

7.7. Атомное время

Практической реализацией TT является *Международное Атомное Время* - *International Atomic Time* - IAT или, используя французскую аббревиатуру, - TAI. Земное Динамическое Время и Международное Атомное Время связаны соотношением: TAI = TDT - 32,184 секунды. Шкалу атомного времени задают и хранят с относительной ошибкой 10^{-13} *цезиевые стандарты частоты и времени*. В системе SI одна секунда равна 9192631770 периодам колебаний, соответствующих переходу электронов между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133. Именно этот период является эталоном для измерения атомного времени.

7.8. Астрономическое время, связь астрономического времени и атомного времени

Эталоном для измерения *астрономического времени* является период вращения Земли. Существует *Всемирное Солнечное Время* - *Universal Time (UT)* и *Звездное (Сидерическое) Время*. В свою очередь, существуют три системы Всемирного Времени. UT0 - это Всемирное Время, полученное непосредственно из наблюдений звезд. При этом для перехода от Звездного Времени ко Всемирному Солнечному Времени используют известное численное соотношение между длительностью солнечных и звездных суток: продолжительность солнечных больше продолжительности звездных суток на 3 минуты 55,91 секунды. UT0 течет неравномерно. В первую очередь неравномерность суточного вращения Земли вызвана движениями полюса. UT1 - это UT0, исправленное за движения полюса. Скорость суточного вращения Земли подвержена сезонным вариациям. UT2 - это UT1, исправленное за сезонные вариации скорости суточного вращения Земли. Но и шкала UT2 также неравномерна. Скорость суточного вращения Земли из года в год уменьшается и сутки удлиняются.

Национальные Службы Частоты и Времени объединены во всемирную *Службу Частоты и Времени*. Национальные Службы Частоты и Времени поддерживают показания своих атомных часов, работающих на основе цезиевых и водородных стандартов частоты, близкими к UT1. Цезиевые и водородные стандарты хранят частоту генерируемых ими колебаний с относительными ошибками 10^{-13} и 10^{-14} соответственно. Чтобы согласовать показания равномерно идущих атомных часов с неравномерно текущим астрономическим временем, в показания атомных часов время от времени вводят *секундный скачок*. Делают это одновременно, по предварительному согласованию, во всех Национальных Службах Частоты и Времени, когда разница между Атомным и Всемирным Временем превысит 0,5 секунды. Полученное таким образом время, текущее со скоростью TAI, называют *Всемирным Координированным Временем* - *Universal Time Coordinated - UTC*. Работу Национальных Служб и функционирование национальных стандартов частоты и времени координирует расположенное во Франции *Международное Бюро Времени* (МБВ) - *Bureau International de l'Heure (BIH)*.

7.9. Время, реализуемое спутниковой системой

Время GPS Navstar - **GPST (GPSTime)** - это время, по своей природе сходное с атомным временем TAI. Время GPS Navstar непрерывно и не подвергается, как UTC, секундным скачкам. Время GPS Navstar задают с использованием цезиевых стандартов частоты и времени, расположенных на *Главной Станции Управления и Контроля* - *GPS Master Control Station*, расположенной в Объединенном Космическом Центре - Consolidated Space Operations Center - CSOS, Колорадо Спрингс, штат Колорадо, США. GPST установили по UTC в 0 часов 6 января 1980 года.

Время ГЛОНАСС поддерживают близким к *Национальному Координированному Времени Советского Союза UTC(SU)*. Время ГЛОНАСС реализуют водородные стандарты частоты, установленные в *Центральном Синхронизаторе*. Поправка шкалы времени ГЛОНАСС относительно шкалы Национального Времени UTC(SU) включена в состав навигационного спутникового сообщения. Также, как и UTC, UTC(SU) подвергают секундным скачкам

Повторим, что совокупность системы координат и системы времени представляет собой систему относимости или референцную систему. Совокупность земной (общеземной) системы координат – прямоугольной или эллипсоидальной – и геоцентрического координированного времени - TCG – называют *Международной Земной Референцной Системой* – *International Terrestrial Reference System – ITRS*.

В подразделе 7.3 написано, что помимо земной системы координат используют инерциальную систему координат. Повторим, что эта система не испытывает вращения, в

том числе, не вращается вместе с Землёй, и в ней справедливы законы Ньютона. Начало инерциальной системы координат располагают в барицентре, то есть, в центре масс Солнечной Системы. Совокупность инерциальной системы координат и Барицентрического Динамического Времени - Barycentric Dynamical Time – BDT – называют *Международной Небесной Референцной Системой* – *International Celestial Reference System* – ICRS.

7.10. Астрономические координаты, отклонения отвесных линий

Астрономические координаты пункта получают в результате выполненных на этом пункте астрономических (астрометрических) наблюдений. Астрономические координаты пункта связаны с *направлением отвесной линии* на данном пункте, то есть они связаны с направлением вектора силы тяжести в этом пункте. Плоскость *астрономического экватора* перпендикулярна мгновенному положению оси вращения Земли на эпоху наблюдений. Плоскость *астрономического вертикала* пункта содержит отвесную линию на данном пункте. *Астрономический меридиан* данного пункта, как один из вертикалов, - это плоскость, содержащая *отвесную линию* на данном пункте и точку мгновенного (на эпоху наблюдений) северного полюса. *Астрономическая широта* φ пункта - это угол между отвесной линией на этом пункте и плоскостью астрономического экватора. *Астрономическая долгота* λ пункта - это двугранный угол между астрономическим меридианом этого пункта и Гринвичским астрономическим меридианом. *Астрономический азимут* α направления из данного пункта на наблюдаемый пункт - это двугранный угол между астрономическим меридианом данного пункта и астрономическим вертикалом, содержащим наблюдаемый пункт.

Уклонением u отвесной линии (уклонением отвеса) в данном пункте называют угол между направлением отвесной линии и направлением нормали к поверхности эллипсоида. Уклонение отвеса раскладывают на две составляющие: составляющую ξ уклонения отвеса в плоскости меридиана пункта и составляющую η уклонения отвеса в плоскости первого вертикала пункта. Между значением u полного уклонения отвеса и значениями составляющих ξ и η этого уклонения существует соотношение:

$$u^2 = \xi^2 + \eta^2 . \quad (7.12)$$

Уклонение отвеса, заданное в такой форме, называют *уклонением отвеса в геометрическом определении*. Существует ещё понятие *уклонения отвеса в физическом (гравиметрическом) определении*. Уклонение отвеса в физическом определении - это угол между направлением отвесной линии реального поля силы тяжести Земли и направлением отвесной линии поля силы тяжести Нормальной Земли. Другими словами, уклонение отвеса в физическом определении - это угол между силовой линией реального поля силы тяжести Земли и силовой линией нормального поля силы тяжести в данном пункте.

Геодезические эллипсоидальные координаты пункта, астрономические координаты пункта и составляющие уклонения отвеса в геометрическом определении на этом же пункте связаны следующими соотношениями:

$$B = \varphi - \xi , \quad (7.13)$$

$$L = \lambda - \eta \sec \varphi .$$

Если используют отклонения отвеса в физическом определении, то геодезическая широта пункта и астрономическая широта того же пункта связаны следующим соотношением:

$$B = \varphi - \xi - \Delta B . \quad (7.14)$$

Здесь ΔB — поправка за кривизну силовой линии поля нормальной силы тяжести.

Геодезический азимут A и астрономический азимут α связаны *уравнением Лапласа*:

$$A = \alpha - (\lambda - L)\sin\varphi = \alpha - \eta\operatorname{tg}\varphi . \quad (7.15)$$

Результаты астрономических определений сочетают с результатами наземных угловых и линейных геодезических измерений, а также с результатами измерения силы тяжести. Целью такого сочетания является обработка плановых геодезических сетей высших классов. Эти сети так и называют *астрономо-геодезическими сетями*. Одним из основных результатов такого сочетания астрономических и геодезических измерений является определение значений отклонений отвеса в пунктах геодезической сети. В свою очередь, значения отклонений отвеса используют для *редуцирования результатов угловых и линейных измерений* на поверхность земного эллипсоида. И только после такого редуцирования возможна строгая, в математическом смысле, обработка результатов измерений, выполненных в плановых геодезических сетях высшего класса точности.

7.11. Редуцирование результатов измерений на поверхность земного эллипсоида

Редуцирование выполняют при обработке результатов в плановых геодезических сетях, создаваемых наземными методами *триангуляции, полигонометрии и трилатерации*. Чтобы получить координаты пунктов такой сети в геодезической эллипсоидальной системе координат, необходимо редуцировать результаты измерений на поверхность земного эллипсоида: референц-эллипсоида или общеземного эллипсоида. Эллипсоид, на который редуцируют результаты измерений, называют *эллипсоидом относимости*.

Сущность *процедуры редуцирования* состоит в следующем. Для каждого пункта геодезической сети, расположенного, на физической поверхности Земли, находят соответствующую ему точку на поверхности эллипсоида относимости. В геометрическом смысле эта процедура состоит в том, что проектирование пункта выполняют по нормали к поверхности эллипсоида относимости. Чтобы выполнить редуцирование результата измерения расстояния между двумя пунктами прямую линию, связывающую центры пунктов геодезической сети, заменяют проекцией этой линии на поверхность эллипсоида относимости. Геометрия решения задачи представлена на рисунке 7.3.

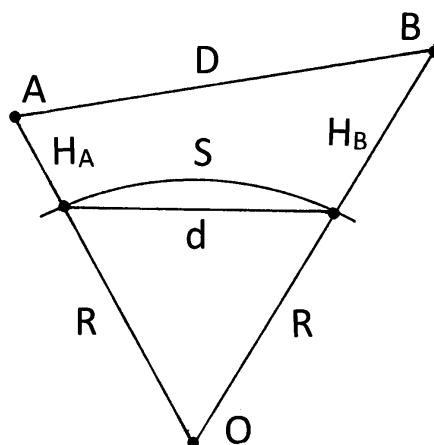


Рисунок 7.3. Редуцирование результата измерения расстояния на поверхность земного эллипсоида.

На этом рисунке D – расстояние, измеренное между пунктами A и B ; H_A и H_B – геодезические высоты пунктов A и B ; d – хорда, соединяющая проекции пунктов A и B на поверхности эллипсоида; S – проекция измеряемой линии на поверхности эллипсоида относимости; O – центр эллипсоида относимости; R – среднегеометрический радиус поверхности эллипсоида относимости $R = \sqrt{M \cdot N}$, смотри формулы (7.10) и (7.11). Длина проекции S представляет собой кратчайшее по поверхности эллипсоида расстояние между проекциями на эту поверхность пунктов A и B . Такую линию на поверхности эллипсоида называют *геодезической линией*, а длину её вычисляют по формуле:

$$S = d + \frac{D^3}{24R^2} . \quad (7.16)$$

Длину хорды вычисляют по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{D^2 - (H_B - H_A)^2}{\left(1 + \frac{H_A}{R}\right) \cdot \left(1 + \frac{H_B}{R}\right)}} . \quad (7.17)$$

Измеренный на пункте геодезической сети горизонтальный угол между направлениями на два пункта заменяют углом на поверхности эллипсоида, образованным геодезическими линиями, связывающими проекцию пункта наблюдения с проекциями наблюдаемых пунктов. Процедура редуцирования горизонтальных углов сводится к тому, что в результаты измерений вводят поправки, которые называют *поправками за редуцирование*. Формулы для вычисления этих поправок приведены в учебниках и учебных пособиях по сфероидической геодезии и по теоретической геодезии. Аргументами в этих формулах служат геодезические эллипсоидальные координаты пунктов, а также составляющие уклонения отвеса.

7.12. Системы отсчёта, используемые в высшей геодезии

Как написано, совокупность системы координат и системы времени представляет собой систему отсчёта или референцную систему. Совокупность общеземной системы координат – прямоугольной или эллипсоидальной – и геоцентрического координированного времени – TCG – называют Международной Земной Референцной Системой – International Terrestrial Reference System – ITRS. За задание и реализацию ITRS отвечает Международная Служба Вращения Земли и Референцных Систем – International Earth Rotation and Reference Systems Service – IERS.

Начало инерциальной системы координат располагают в барицентре, то есть, в центре масс Солнечной Системы. Совокупность инерциальной системы координат и Барицентрического Динамического Времени - Barycentric Dynamical Time – BDT – называют Международной Небесной Референцной Системой – International Celestial Reference System – ICRS. За задание и реализацию ICRS отвечает также IERS.

8. Практическая реализация инерциальной системы координат и земной системы координат

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Баранов], [Крылов, 2002], [Крылов, 2014], [Прилепин], [Томпсон], [Урмаев], [Шануров], [IERS], [NASA], [Burša,] [Jekeli] и [Mueller].

Понятие Международной Небесной Референцной Системы ICRS, включающей инерциальную систему координат, является понятием идеальным. Идеальным также является понятие Международной Земной Референцной Системы ITRS, включающей общеземную геоцентрическую систему координат. Для того, чтобы геодезисты могли использовать любую систему координат в своей практической деятельности, необходимо, чтобы эта система координат удовлетворяла требованию *реализуемости*. Это означает, что система координат должна быть фиксирована (закреплена) реально физически существующими пунктами и/или объектами. Таковыми объектами, наилучшим образом фиксирующими инерциальную систему координат, являются квазары с приписанными им экваториальными координатами α и δ . Соответствующую практическую реализацию инерциальной системы координат будем называть *квазиинерциальной* системой координат. Международно принятым её названием является *International Celestial Reference Frame (ICRF) – Международная Небесная Референцная Опора*. Пунктами, наилучшим образом фиксирующими земную геоцентрическую систему координат, являются пункты *глобальной геодезической сети*. Соответствующую практическую реализацию земной системы координат будем называть *квазигеоцентрической системой координат*. Международно принятым её названием является *International Terrestrial Reference Frame (ITRF) – Международная Земная Референцная Опора*. За задание и реализацию ICRF и ITRF, также, как и задание и реализацию ICRS и ITRS отвечает *Международная Службы Вращения Земли и Референцных Систем – International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS*.

Координаты пункта или вектора, выраженные в квазиинерциальной системе координат и в квазигеоцентрической системе координат, связывают, используя матрицу \mathbf{R} , формула (7.5). Аргументами этой матрицы являются *Параметры Вращения Земли – Earth Rotation Parameters (ERP)*. Их называют также *Параметрами Ориентации Земли – Earth Orientation Parameters (EOP)*. Эти параметры включают угловые величины, которые определяют ориентацию мгновенной оси вращения Земли в квазиинерциальной системе координат, то есть они представляют собой параметры прецессии и нутации. Параметры вращения Земли включают также координаты мгновенного полюса относительно Международного Условного Начала - Условного Земного Полюса. И, кроме того, параметры вращения Земли включают вариации в скорости суточного вращения Земли. Параметры вращения Земли определяют, используя метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, с ошибками в тысячную долю угловой секунды.

8.1. Практическая реализация инерциальной системы координат

Для того, чтобы практически реализовать инерциальную систему координат, то есть, для того, чтобы создать квазиинерциальную систему координат, используют результаты наблюдений, выполненных методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой - РСДБ. Инструментом наблюдений в РСДБ является радиотелескоп. На рисунке 8.1 показан радиотелескоп, расположенный в посёлке Светлое, недалеко от Санкт-Петербурга, предназначенный для работы в режиме радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой [ira.nw.ru].



Рисунок 8.1. Радиотелескоп радиообсерватории «Светлое»

Квазары - это естественные небесные объекты, находящиеся на расстояниях от Земли в миллиарды световых лет. По причине столь большой удаленности от Земли квазары не имеют заметных собственных движений на уровне тысячной доли угловой секунды. Следовательно, направления на квазары, в форме их экваториальных координат α и δ , фиксируют квазиинерциальную систему координат именно на уровне ошибки в тысячную долю угловой секунды. Начало этой системы координат совмещено с барицентром, то есть, с центром масс Солнечной системы. Основой этой системы является каталог, содержащий координаты 212 квазаров. Координаты этих квазаров фиксированы с ошибкой в одну тысячную угловой секунды. Каталог также включает координаты 118218 звёзд, определённых в ходе миссии HIPPARCOS.

Имеется также принципиальная возможность практически реализовать квазиинерциальную систему координат, реализуя метод лазерной локации. В этом методе наблюдают искусственные спутники Земли LAGEOS и ЭТАЛОН. Инструментом наблюдения является спутниковый лазерный светодальномер. Фотография такого светодальномера приведена на рисунке 8.2 [wikipedia.org].



Рисунок 8.2. Спутниковый лазерный светодальномер

8.2. Искусственные спутники Земли LAGEOS и ЭТАЛОН

Вокруг Земли вращаются предназначенные для решения задач высшей геодезии и геодинамики искусственные спутники LAGEOS и ЭТАЛОН. На рисунке 8.3 приведена фотография американского спутника LAGEOS, [cidorova.ru].



Рисунок 8.3. Спутник LAGEOS

На поверхности спутника укреплены 426 трипельпризменных отражателя. Существуют два спутника: LAGEOS-1 и LAGEOS-2, запущенные, соответственно, в 1976 и в 1992 году на круговые орбиты с углом наклона к плоскости экватора в 110 градусов и в 53 градуса. Каждый спутник вращается на орбите высотой в 5900 километров, период обращения равен 3 часам и 45 минутам.

Существуют два российских (советских) спутника ЭТАЛОН. Конструкция спутника ЭТАЛОН аналогична конструкции спутника LAGEOS. Фотография спутника ЭТАЛОН приведена на рисунке 8.4 [kik-sssr.ru].

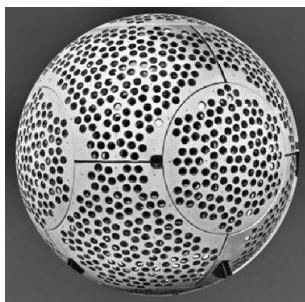


Рисунок 8.4. Спутник ЭТАЛОН

Спутники ЭТАЛОН расположены на орбитах, высота которых над земной поверхностью равна высоте орбит спутников ГЛОНАСС, то есть 19100 км. Это даёт возможность изучать структуру гравитационного поля Земли именно на высоте движения спутников ГЛОНАСС, что позволяет уточнять модели движения спутников ГЛОНАСС. Наблюдая спутники LAGEOS и ЭТАЛОН методом лазерной локации, получают *координаты* расположенных на станциях слежения спутниковых лазерных светодальномеров в квазигеоцентрической системе координат с ошибкой около сантиметра.

8.3. Практическая реализация земной системы координат

Геодетическая квазигеоцентрическая система координат связана с Землей и является условной - conventional, то есть заданной по официальной договоренности между компетентными и уполномоченными на это специалистами. Глобальную геодетическую квазигеоцентрическую систему координат фиксируют пункты глобальной геодетической сети. Эту сеть также называют Международной Земной Референцной Опорой - International Terrestrial Reference Frame – ITRF. Местоположение некоторых из пунктов глобальной геодетической сети, созданной с использованием метода РСДБ, представлено на рисунке 8.5.

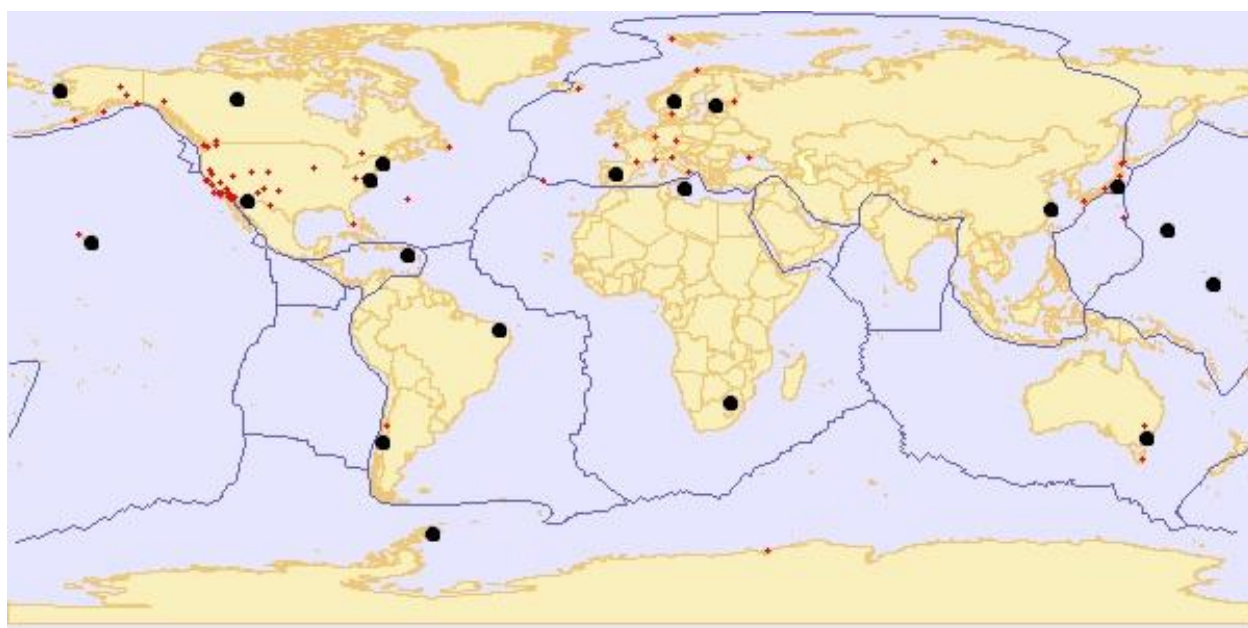


Рисунок 8.5. Станции ITRF

На пунктах глобальной геодетической сети ITRF установлены и работают лазерные спутниковые светодальномеры. Это позволяет объединить результаты, полученные

методом РСДБ и методом лазерной локации искусственных спутников Земли. Такое объединение позволяет отнести координаты векторов баз, определённых методом РСДБ, к центру масс Земли с ошибкой, не превышающей нескольких сантиметров. Кроме этого, имеется возможность взаимно контролировать результаты, полученные этими независимыми друг от друга методами.



Рисунок 8.6. Радиотелескоп РТ-22, посёлок Симеиз, гора Кошка, Крым, Российская Федерация

В настоящее время ITRF включает около 800 пунктов. На большинстве из них установлены только приёмники системы глобального позиционирования. На 29 пунктах расположены радиотелескопы, в том числе изображённый на рисунке 8.6 радиотелескоп радиообсерватории «Симеиз» [murmiau.com]. Радиотелескоп с диаметром антенны 22 метра построен в 1960 году. Это – пока единственный российский радиотелескоп, входящий в ITRF.

Длины баз радиоинтерферометров достигают нескольких тысяч километров. Координаты пунктов глобальной геодезической сети и разности этих координат определены с ошибками в пределах одного сантиметра. На таком уровне точности необходимо учитывать вековые деформации земной поверхности вследствие движений литосферных (геотектонических) плит. Материки и острова взаимно перемещаются со скоростью до 10 сантиметров в год. На рисунке 8.7 приведена схема литосферных плит и разломов, разделяющих эти плиты [www.dslib.net/geo-kartografia/kartografirovaniye-geodinamicheskikh-processov.html].

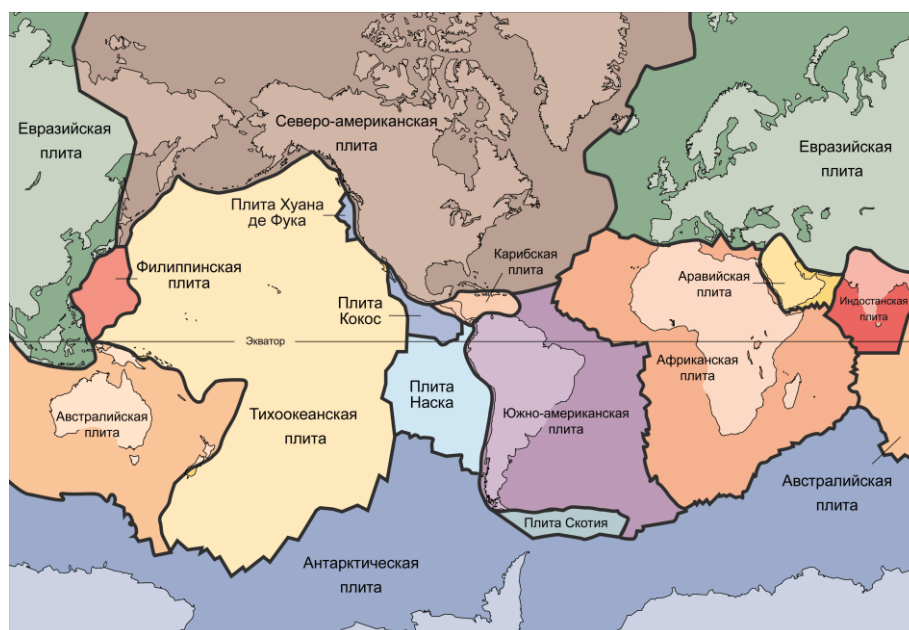


Рисунок 8.7. Литосферные плиты и тектонические разломы

Именно по причине того, что земная кора постоянно деформируется, каталог координат пунктов глобальной геодезической сети время от времени обновляют. При создании каталога пунктов глобальной геодезической сети используют геофизические модели, учитывающие относительное перемещение литосферных плит. В настоящее время используют модель NUVEL-1A. Накопленные результаты измерений используют для уточнения параметров геофизической модели.

Геодезической сетью, сгущающей ITRF, является сеть станций IGS – International GNSS Service – Международная Служба Спутниковых Систем Глобальной Навигации. На рисунке 8.8 показана сеть станций IGS [sonel.org].

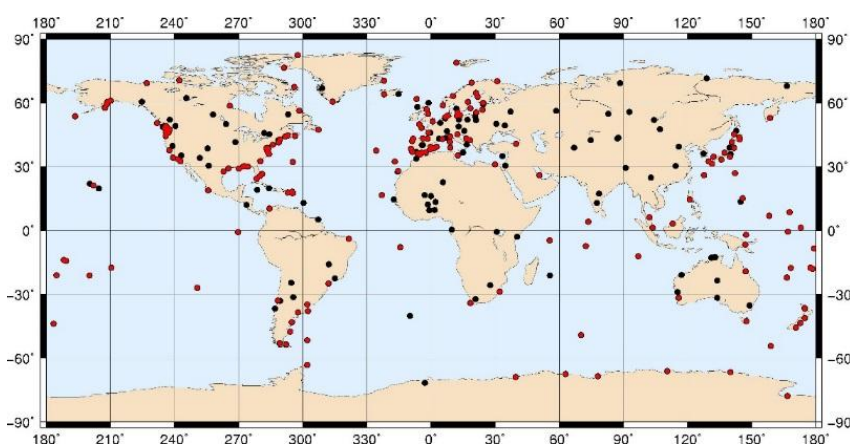


Рисунок 8.8. Станции IGS

На рисунке 8.9 представлена станция IGS, совмещённая с радиотелескопом, представляющим собой станцию ITRF [igscb.jpl.nasa.gov].



Рисунок 8.9. Станция IGS, совмещённая со станцией ITRF

Каждая станция IGS представляет собой постоянно действующую референционную станцию. Таким образом, станции IGS представляют собой основу для распространения ITRF на все геодезические сети, созданные и создаваемые спутниковым методом и наземными геодезическими методами.

9. Сочетание космических и наземных методов высшей геодезии

При написании этого раздела использованы следующие работы: [Баранов], [Морозов], [Пеллинен], [Яковлев], [Moritz] и [Torge].

В процессе создании геодезических сетей наземными методами используют процедуру редуцирования результатов измерений на поверхность земного эллипсоида. Это необходимо для того, чтобы с использованием математического аппарата сфероидической геодезии выполнить строгую обработку сети. Координаты пунктов плановых геодезических сетей выражали в эллипсоидальной геодезической системе координат B , L , H . Геодезическую широту B и геодезическую долготу L называют плановыми координатами, а геодезическую высоту H называют высотной координатой. Плановые координаты и высоту пунктов определяли принципиально разными методами и с разной точностью.

Геодезическую широту и геодезическую долготу пунктов Государственной геодезической сети Советского Союза определяли, создавая плановую геодезическую сеть, для чего, в основном, применяли метод триангуляции. Результаты геодезических и астрономических наблюдений объединяли и вычисляли значения составляющих отклонений отвесных линий на пунктах Лапласа, которые и использовали для редуцирования результатов измерений на поверхность эллипсоида относимости.

Геодезическую высоту пунктов Государственной геодезической сети Советского Союза определяли, используя формулу (5.7), как сумму нормальной высоты и аномалии высоты. Нормальные высоты H^N пунктов определяют, создавая высотную геодезическую сеть, для чего метод геометрического нивелирования сочетают с результатами измерения

ускорения силы тяжести. Эта сеть называется также Государственной нивелирной сетью. Значения аномалии высоты ξ определяли, используя метод астрономо-гравиметрического нивелирования. Исходными данными для выполнения астрономо-гравиметрического нивелирования являются значения составляющих уклонений отвеса на пунктах астрономо-геодезической сети и результаты гравиметрической съёмки. Ошибка определения аномалии высоты ξ составляла несколько дециметров, таковой же, следовательно, была и ошибка определения геодезической высоты H . Для редуцирования результатов измерений на поверхность эллипсоида относимости допустима была ошибка определения геодезической высоты, равная 3 метрам. Таким образом, с использованием наземных методов измерений геодезические координаты пунктов получали раздельно, в несколько этапов и с разной точностью: ошибка геодезической высоты пункта была гораздо больше ошибки его плановых координат.

Принципиальной была следующая проблема. С одной стороны, необходимой процедурой была, как написано, процедура редуцирования результатов измерений, выполненных в геодезической сети, на поверхность относимости, то есть, на поверхность земного эллипсоида. С другой стороны, чтобы задать земной эллипсоид для территории, которую занимает геодезическая сеть, необходимо уже иметь созданную сеть. Проблему эту для Государственной геодезической сети Советского Союза решили, как это часто делают в геодезии, используя метод приближений. На начальных этапах создания геодезической сети вместо метода редуцирования на поверхность относимости использовали метод развёртывания. Сущность метода развёртывания состоит в том, что геодезические высоты пунктов принимали равными нормальным (ортометрическим) их высотам. Иными словами, результаты измерений проектировали не на поверхность эллипсоида, а на поверхность геоида (квазигеоида). Когда был накоплен достаточный объём измерений в геодезической сети Советского Союза и поверхность относимости была задана, стали реализовать метод проектирования результатов измерений на поверхность референц-эллипсоида.

В настоящее время опорные геодезические сети создают с использованием космических методов: метода радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой, метода лазерной локации искусственных спутников Земли и, по большей части, с использованием спутникового метода, основанного на применении спутниковых систем глобального позиционирования GPS Navstar и ГЛОНАСС. При таком подходе естественной, то есть удобной для обработки результатов измерений и представления результатов этой обработки, является прямоугольная трёхмерная (декартова) геодезическая система координат X , Y , Z . Это исключает необходимость в редуцировании результатов измерений на поверхность относимости до обработки и уравнивания сети. Редуцирование на поверхность эллипсоида выполняют уже после обработки и уравнивания сети. Полученные эллипсоидальные геодезические координаты пунктов используют для того, чтобы перейти к координатам на плоскости геодезической, либо картографической проекции, например, проекции Гаусса-Крюгера.

Существенным признаком космических методов создания опорных геодезических сетей является то, что все три координаты пунктов геодезических сетей и разности координат этих пунктов получают совместно и с одинаковой точностью; при этом их получают не поэтапно, а сразу именно в геодезической системе координат. Ошибка определения взаимного положения пунктов геодезической сети, созданной с

использованием систем глобального позиционирования, лежит в пределах одного сантиметра.

Спутниковый метод при создании региональных и локальных опорных геодезических сетей во всех отношениях эффективнее наземных методов: триангуляции, трилатерации и полигонометрии. Спутниковый метод не требует постройки знаков на пунктах геодезической сети, спутниковые наблюдения выполняют вне зависимости от условий видимости, длительность наблюдений на пункте в большинстве случаев не превышает нескольких часов. Ранее, если наблюдатель выполнил наблюдения на пункте триангуляции 1 или 2 класса в течение недели, это считали успехом. Иногда, из-за плохих условий видимости, наблюдатель находился на пункте в течение месяца или дольше. Ещё более сложной в этом смысле ситуация была при выполнении астрономических наблюдений на пунктах Лапласа. Все эти обстоятельства привели к тому, что спутниковый метод заменил методы триангуляции, трилатерации и полигонометрии в области создания опорных геодезических сетей.

Наземные методы сохранили своё значение при выполнении работ на локальных объектах. Наиболее точные светодальномеры позволяют измерять расстояния с ошибкой, лежащей в пределах одной десятой миллиметра. Такая точность пока недостижима для спутниковой аппаратуры. Поэтому высокоточные линейные измерения выполняют при создании прецизионных геодезических сетей на метрологических полигонах. На пунктах таких сетей проводят метрологическую аттестацию комплектов спутниковых приёмников и их программного обеспечения.

Возникновение и внедрение в геодезическую практику спутникового метода создания геодезических сетей не уменьшило необходимости изучения поля силы тяжести Земли методами гравиметрии, скорее – увеличило эту необходимость. Геометрическое нивелирование также не потеряло своего значения. Именно высокоточное и точное геометрическое нивелирование, в его сочетании с гравиметрией, позволяет определять разность нормальной высоты пунктов, расположенных на расстоянии в несколько километров, с ошибкой, лежащей в пределах одного миллиметра. Нормальные высоты пунктов и разности нормальных высот имеют физический смысл, тогда, как геодезические высоты заданы чисто математически. Именно нормальные высоты широко востребованы практически. Подписи высот на картах даны в системе нормальных высот. Систему нормальных высот используют в гидрографии. На локальном объекте, например, на строительной площадке, для того, чтобы определить превышение между двумя пунктами, не устанавливают на этих пунктах спутниковые приёмники, а устанавливают на них нивелирные рейки, а между ними устанавливают нивелир для выполнения геометрического нивелирования.

Иная ситуация имеет место на участке или объекте большой площади. Например, на газовом месторождении, где тайга создаёт препятствия для проложения нивелирных ходов между далеко расположенными друг от друга пунктами (реперами). В этом случае во всех отношениях эффективнее устанавливать на этих пунктах спутниковые приёмники, определять геодезические высоты пунктов, а затем, используя эти значения, вычислять нормальные высоты этих пунктов. Такой метод получил название *спутникового нивелирования*. В спутниковом нивелировании используют сочетание нормальной высоты H^y пункта, полученной геометрическим нивелированием с привлечением гравиметрических данных, и геодезической высоты H этого же пункта, полученной

спутниковым методом. Это сочетание позволяет, на основе формулы (5.7), получить на этом пункте аномалию высоты:

$$\xi = H - H^Y \quad . \quad (9.1)$$

Значение аномалии высоты получают, используя этот подход, с ошибкой, лежащей в пределах сантиметра. Повторим, что значение аномалии высоты, полученное методом астрономо-гравиметрического нивелирования, имело ошибку в несколько дециметров.

Таким образом, сочетание наземных методов и спутникового метода позволило создать на поверхности Земли дискретную сеть пунктов, в которых с высокой точностью определены значения аномалии высоты. На этой основе созданы модели геоида (квазигеоида). Модель геоида представляет собой непрерывную поверхность и позволяет вычислить значение аномалии высоты в любом пункте, если известны его плановые координаты. Определив спутниковым методом в этой точке геодезическую высоту H и вычислив по модели значение аномалии высоты ξ , можно, используя формулу (5.7), вычислить значение нормальной высоты этого пункта. Ошибка определённой таким образом нормальной высоты определяется ошибкой определения геодезической высоты и ошибкой определения аномалии высоты. Вторая из этих ошибок существенно больше первой. В настоящее время значение аномалии высоты получают с использованием моделей геоида с ошибкой около одного дециметра и стремятся к уменьшению этой ошибки.

10. Термины высшей геодезии

В этом разделе, в дополнение к написанному в предшествующих разделах учебного пособия, дано разъяснение основных терминов, используемых специалистами в области высшей геодезии. Смысл терминов остаётся прежним, но внесены некоторые дополнения и изменена форма изложения.

Высшая геодезия – наука и техническая (практическая) дисциплина. Объектом изучения высшей геодезии как науки является фигура Земли, а также поле силы тяжести Земли. В процессе своей практической деятельности специалисты в области высшей геодезии создают геодезические сети. Средством решения научных и практических задач высшей геодезии, как и геодезии вообще, является измерение линейных величин, угловых величин, а также измерение значений ускорения силы тяжести и/или разностей значений ускорения силы тяжести.

Барицентр – центр масс Солнечной Системы.

Балтийская система высот – система нормальных высот, началом счёта в которой является нуль-пункт Кронштадтского футштока. Балтийская система высот использовалась на территории Советского Союза и используется на территории Российской Федерации.

Высота пункта геодезической сети – одна из координат пункта. Центры, хранящие высоты пунктов называют реперами. Реперы образуют высотные (нивелирные) геодезические сети. Высотные геодезические сети создают сочетанием геометрического нивелирования с данными гравиметрии.

Геодезическая сеть. В геометрическом смысле геодезическая сеть – это совокупность пунктов, координаты центров которых определены в единой для этой сети системе координат и/или в единой для этой сети системе высот. В физическом смысле геодезическая сеть представляет собой гравиметрическую сеть, на пунктах которой определены значения ускорения силы тяжести.

Геоид. В строгом определении геоид – это эквипотенциальная поверхность силы тяжести, содержащая условно выбранное начало счёта высот. Наглядное понятие геоида – невозмущенная поверхность Мирового Океана, мысленно продолженная под материками. Единый для всей поверхности Земли геоид называют глобальным геоидом. На территории Российской Федерации в качестве начала счёта высот выбран нуль-пункт Кронштадского футштока. От поверхности геоида отсчитывают ортометрические высоты.

ГЛОНАСС – система глобальной спутниковой навигации Российской Федерации. Находится под управлением Министерства Обороны РФ.

Земная система координат – система геодезических координат, фиксированная относительно Земли и совершающая суточное вращение вместе с Землёй.

Земной эллипсоид – эллипсоид, поверхность которого наилучшим образом соответствует поверхности геоида. Признаком соответствия является минимум суммы квадратов отклонений поверхности земного эллипсоида от поверхности геоида.

Измерение – процедура сравнения неизвестной заранее с необходимой точностью величины с эталоном этой величины.

Инерциальная система координат – система координат, не испытывающая вращения; система координат, в которой справедливы законы Ньютона.

Координаты пунктов геодезической сети – упорядоченная система чисел, условно приписанных центрам этих пунктов и задающих местоположение этих центров в трёхмерной системе координат.

Кронштадтский футшток – водомерная рейка с керамическими делениями, закреплённая на одном из устоев Синего моста. Синий мост перекинут через Обводной канал. Обводной канал находится в городе Кронштадт, расположенном на острове Котлин, и сообщается с Финским заливом Балтийского моря. Нуль-пункт Кронштадского футштока находится на одной высоте с горизонтальной чертой на металлической табличке, укреплённой в том же устье Синего моста. Эта черта соответствует среднему уровню воды Финского залива по результатам наблюдений 1825-1839 годов. На расстоянии в несколько сотен метров от Кронштадского футштока расположены реперы, в том числе один фундаментальный репер. Высоты этих реперов определены относительно нуль-пункта Кронштадского футштока. Именно эти реперы хранят Балтийскую систему высот. Кронштадтский же футшток и металлическая табличка имеют историческое значение и при выполнении нивелирования нивелирные рейки на них не устанавливают.

Линейные величины, измеряемые в высшей геодезии: расстояния (дальности), разности расстояний, скорости изменения расстояний.

Нормальная Земля - общеземной эллипсоид, которому приписана масса реальной Земли, включая массу атмосферы.

Нормальная сила тяжести – сила тяжести, порождённая Нормальной Землёй. Значение нормальной силы тяжести вычисляют с использованием известных формул.

Общеземная система координат – глобальная единая для всей Земли земная система координат. Общеземная система координат задана общеземным эллипсоидом.

Общеземной эллипсоид – земной эллипсоид, поверхность которого соответствует поверхности глобального геоида. Центр общеземного эллипсоида совпадает с центром масс Земли, объём общеземного эллипсоида равен объёму глобального геоида, угловая скорость суточного вращения общеземного эллипсоида равна угловой скорости суточного вращения Земли.

Оценка точности результата измерений – вычисление средней квадратической ошибки результата измерений.

Оценка точности результата определений – вычисление средней квадратической ошибки определяемых величин, например, координат пунктов.

Позиционирование спутниковое – определение мгновенных значений координат подвижного носителя спутникового приёмника, а также определение мгновенных значений скорости перемещения и азимута перемещения этого носителя.

Преобразование систем координат – процедура перевычисления координат пункта или координат вектора, соединяющего два пункта, из одной системы координат в другую систему координат.

Прямоугольная геодезическая система координат – трёхмерная декартова система координат X, Y, Z . Начало общеземной прямоугольной геодезической системы координат совпадает с центром масс Земли, то есть, совпадает с центром общеземного эллипсоида. Ось Z совпадает с малой осью общеземного эллипсоида и имеет положительное направление в сторону севера; ось X представляет собой пересечение плоскости геодезического экватора и плоскости начального Гринвичского меридиана; ось Y дополняет систему координат до правой.

Пункт геодезической сети состоит из центра и наружного знака. Центр пункта неподвижен относительно земной поверхности и предназначен для того, чтобы хранить координат пункта геодезической сети. Наружный знак пункта имеет вид сигнала, пирамиды или тура (столба). Наружный знак предназначен для установки геодезических приборов.

Референц-эллипсоид – земной эллипсоид, поверхность которого соответствует поверхности геоида на части земной поверхности: на территории одной страны или на территории группы соседствующих стран. Примером референц-эллипсоида является эллипсоид Ф.Н. Красовского.

Сила тяжести – это вектор. Этот вектор представляет собой векторную сумму двух векторов: вектора силы притяжения Земли (силы гравитации) и вектора центробежной силы, порождённой суточным вращением Земли.

Система времени – способ хранения времени и способ измерения длительности интервалов времени.

Система высот – единый для данной геодезической высотной (нивелирной) сети способ задания (вычисления) высот реперов этой сети на основе результатов

геометрического нивелирования и данных гравиметрии. Существуют следующие системы высот: ортометрическая, нормальная и динамическая. Высоты реперов в этих системах высот имеют физический смысл, их объединяют названием высот в поле силы тяжести Земли. Переход от результатов геометрического нивелирования к конкретной системе высот состоит в том, что в измеренные превышения вводят поправки. Системы высот различаются тем, какие именно формулы для вычисления этих поправок используют. Существует система геодезических высот. Высоты пунктов в этой системе высот физического смысла не имеют, но являются чисто геометрическим понятием.

Система геодезических координат – единый для данной геодезической сети способ задания координат пунктов этой сети. Существует глобальная система координат, существуют референчные системы координат.

Система отсчёта – совокупность системы координат и системы времени.

Угловые величины, измеряемые в высшей геодезии и в геодезической астрономии: горизонтальные углы, вертикальные углы (углы наклона, зенитные расстояния), астрономические широты, астрономические долготы, астрономические азимуты.

Ускорение силы тяжести – сила тяжести, действующая на тело единичной массы.

Фигура Земли. В геометрическом смысле фигура Земли – это поверхность Земли, заданная (фиксированная) центрами пунктов геодезической сети (геодезических сетей). В физическом смысле фигура Земли – это поверхность глобального геоида.

Эквипотенциальная поверхность силы тяжести – поверхность постоянного значения потенциала силы тяжести. Наглядное представление об эквипотенциальной поверхности даёт невозмущенная поверхность воды. По этой причине эквипотенциальную поверхность называют уровнем поверхности.

Эллипсоидальная геодезическая система координат – криволинейная система координат. Координаты точки (пункта) в этой системе координат задают в виде геодезической широты B , геодезической долготы L и геодезической высоты H . Эллипсоидальные геодезические координаты пункта определяются нормалью к поверхности земного эллипсоида, опущенной из этого пункта.

Эталон метра – расстояние, которое свет проходит в вакууме за интервал времени, равный $1/299792458$ долю секунды.

ICRS – International Celestial Reference System – Международная Небесная Референчная Система. Система отсчёта, составными частями которой является барицентрическое динамическое время и инерциальная система координат с началом, смещённым с барицентром.

ICRF – International Celestial Reference Frame – Международная Небесная Референчная Опора. ICRF представляет собой практическую реализацию ICRS; основой является барицентрическое динамическое время и каталог, содержащий координаты 212 квазаров и 118218 видимых звёзд.

ITRS – International Terrestrial Reference System – Международная Земная Референчная Система. Система отсчёта, составными частями которой является геоцентрическое координированное время и общеземная система координат.

ITRF – International Terrestrial Reference Frame – Международная Земная Референцная Опора. ITRF представляет собой практическую реализацию ITRS; основой является геоцентрическое координированное время и каталог координат пунктов глобальной геодезической сети.

NAVSTAR (GPS) - система глобальной спутниковой навигации Соединённых Штатов Америки. Находится под управлением Департамента Обороны США.

Литература

1. [Баранов] Баранов В.Н., Бойко Е.Г., Краснорылов И.И. и др. Космическая геодезия. Москва. Недра. 1986. 407 с.
2. [Бурдун] Бурдун Г.Д. Справочник по международной системе единиц. Москва. Издательство стандартов. 1980. 123 с.
3. [Галазин] Галазин В.Ф., Каплан Б.Л. и др. Система геодезических параметров Земли “Параметры Земли 1990 года” (ПЗ-90). Под общей редакцией Хвостова В.В. Москва. Координационный научно - информационный центр. 1998. 40 с.
4. [Голубев] Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. Радиогеодезические и электрооптические измерения. Москва. Недра. 1985. 303 с.
5. [Закатов] Закатов П.С. Курс высшей геодезии. Москва. Недра. 1976. 511 с.
6. [Красовский, 1942] Красовский Ф.Н. Руководство по высшей геодезии, часть 2, Москва, Геодезиздат, 1942.
7. [Красовский, 1955] Красовский Ф.Н. Избранные сочинения, том 3, Москва, Геодезиздат, 1955.
8. [Крылов, 2002] Крылов В.И. Космическая геодезия. М. МИИГАиК. 2002. 168 с.
9. [Крылов, 2003] Крылов В.И. Введение в теорию систем отсчета. Москва. МИИГАиК. 2003. 90 с.
10. [Крылов, 2014] Крылов В.И. Координатно-временные преобразования в геодезии. Москва. МИИГАиК. 2014. 90 с.
11. [Кузнецов] Кузнецов А.Н. Геодезическая астрономия. М. Недра. 1966. 370 с.
12. [Маркузе] Маркузе Ю.И., Бойко Е.Г., Голубев В.В. Геодезия. Вычисление и уравнивание геодезических построений. Москва. Картгеоцентр и Геодезиздат. 1994.
13. [Молоденский] Молоденский М.С., Еремеев В.Ф., Юркина М.И. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли. Труды ЦНИИГАиК, 1960. Выпуск 131. Москва. 250 с.
14. [Морозов] Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии. М. Недра. 1969. 304 с.
15. [Огородова, 1978] Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия. Москва. Недра. 1978. 325 с.
16. [Огородова, 2006] Огородова Л.В. Высшая геодезия. Часть 3. Теоретическая геодезия. Москва. Геодезкартиздат. 2006. 381 с.
17. [Одуан] Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. Москва. Техносфера. 2002. 399 с.
18. [Пеллинен] Пеллинен Л.П. Высшая геодезия. Теоретическая геодезия. Москва. Недра. 1978. 263 с.
19. [Прилепин] Прилепин М.Т., Шануров Г.А. Метод длиннобазисной интерферометрии и его геодезические приложения. Итоги науки и техники. ВИНТИ. Геодезия и аэросъемка. 1983. Том 21. с. 66-105.
20. [Серапинас] Серапинас Б.Б. Основы спутникового позиционирования. Издательство московского университета. Москва. 1998. 82 с.
21. [Спиридонов] Спиридонов А.И. Основы геодезической метрологии. Москва. Картгеоцентр - Геодезиздат. 2003. 247 с.

22. [Томпсон] Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. Перевод с английского. Москва. Мир. 1989. 568 с.
23. [Торге] Торге В. Гравиметрия. Москва. Мир. 1999. 428 с.
24. [Тюрин] Тюрин Н.И. Введение в метрологию. Москва. Издательство стандартов. 1976. 108 с.
25. [Урмаев] Урмаев М.С. Орбитальные методы космической геодезии. Москва. Недра. 1981. 256 с.
26. [Халхунов] Халхунов В.З. Сферическая астрономия. М. Недра. 1972. 304 с.
27. [Харисов] Харисов В.Н. и др. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. Москва. ИПРЖР. 1999.
28. [Центры] Правила закладки центров на пунктах геодезической и нивелирной сетей. Москва. КГЦ Геодезиздат. 1993.
29. [Шануров] Шануров Г.А., Мельников С.Р. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ. Москва. МИИГАиК. 2001. 136 с.
30. [Юзефович] Юзефович А.П. Поле силы тяжести и его изучение. М. МИИГАиК. 2014. 191 с.
31. [Яковлев] Яковлев Н.В. Высшая геодезия. Москва. Недра. 1989. 445 с.
32. [Burša] Milan Burša, Karel Pěč. Gravity Field and Dynamics of the Earth. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest. P. 250.
33. [Hofmann] B. Hofmann-Wellenhoff, H. Lichtenegger, J. Collins. Global Positioning System. Theory and Practice. Second edition. Springer-Verlag. Wien. New York. p. 326.
34. [IERS] Dennis D. McCarthy. IERS Conventions (1996). IERS Technical Note 21, July 1996, p. 95.
35. [Jekeli] Christopher Jekeli. Geometric Reference Systems in Geodesy. Division of Geodesy and Geospatial Science. School of Earth Sciences. Ohio State University. July 2006, p. 202.
36. [Moritz] B. Hofmann-Wellenhoff, H. Moritz. Physical Geodesy. Springer-Verlag. Wien, New York.
37. [Mueller] Mueller I.I. Spherical and practical astronomy as applied to geodesy. F. Ugar. N.Y. 1969.
38. [NASA] NASA TM 104552 Crustal Dynamics Project. Data Analysis - 1991. VLBI Geodetic Results 1979-1990.
39. [Torge] Torge W. Geodesy. Walter de Gruyter. Berlin - New York. 1991.

Аннотация.

Основой для решения научных и практических задач геодезии и картографии являются геодезические сети. С использованием светодальномеров, а также с использованием точных и высокоточных теодолитов создавали плановые геодезические сети. С использованием баллистических и статических гравиметров создавали и создают гравиметрические сети. С использованием точных и высокоточных нивелиров создавали и создают высотные геодезические сети. В процессе создания высотных геодезических сетей используют результаты измерения силы тяжести. Глобальную геодезическую сеть создали и совершенствуют методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой в сочетании с методом лазерной локации искусственных спутников Земли. Пункты глобальной геодезической сети являются основой для задания и хранения земной системы координат. Региональные и локальные геодезические сети создают спутниковым методом. Пункты глобальной геодезической сети являются исходными для региональных

геодезических сетей. Пункты региональных геодезических сетей являются исходными для локальных геодезических сетей.