

**Негосударственное частное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный открытый институт г. Санкт-Петербург»**

Тарелкин Е.П., Трачук Н.Е.

Высшая геодезия

Учебное пособие

Рекомендовано Саморегулируемой организацией
НП «Изыскатели Санкт-Петербурга и Северо-Запада»
для студентов, обучающихся по направлениям
120100.62 «Геодезия и дистанционное зондирование»
и 120700.62 «Землеустройство и кадастры»
и слушателей курсов повышения квалификации

Санкт-Петербург
2015

УДК 528.2/.3

ББК 26.11

T19

ТАРЕЛКИН, ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ

ТРАЧУК, НАТАЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВНА

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 120100.62 «Геодезия и дистанционное зондирование» и 120700.62 «Землеустройство и кадастры». В пособии изложены теоретические вопросы дисциплины.

УДК 528.2/.3

ББК 26.11

ISBN 978-5-906759-12-2

© Тарелкин Е.П., 2015

Трачук Н.Е., 2015

©НОИР 2015

© ИКЦ 2015

Предисловие

Согласно Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования подготовки бакалавров по направлению «Геодезия и дистанционное зондирование», объектом профессиональной деятельности выпускника являются: поверхность Земли, других планет и их спутников; территориальные и административные образования; искусственные и естественные объекты на поверхности и внутри Земли и других планет, а также околоземное космическое пространство; геодинамические явления и процессы; гравитационные, электромагнитные и другие физические поля.

Согласно Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования подготовки бакалавров по направлению «Землеустройство и кадастры», объектом профессиональной деятельности выпускника являются: земельные и другие виды природных ресурсов; категории земельного фонда; территории административных образований; территориальные зоны; зоны с особыми условиями использования территорий; зоны специального правового режима; землепользования и земельные участки в зависимости от целевого назначения и разрешенного использования; земельные угодья; единые объекты недвижимости и кадастрового учета; информационные системы и технологии кадастра недвижимости; геодезическая и картографическая основы землеустройства и кадастра недвижимости.

Область профессиональной деятельности бакалавров включает:

- получение измерительной пространственной информации о поверхности Земли, отображение поверхности Земли или отдельных её территорий на планах и картах;
- осуществление координатно-временной привязки объектов, явлений и процессов на поверхности Земли;
- организация и осуществление работ по сбору и распространению геопространственных данных как на территорию Российской Федерации в целом, так и на отдельных её регионах с целью развития их инфраструктуры.

Цель изучения дисциплины – сформировать у будущих бакалавров знания в области высшей геодезии и теории фигуры

Земли, принципов решения геодезических задач на поверхности земного эллипсоида.

Задачи дисциплины:

- сформировать знания по применению теории, методов и средств изучения фигуры Земли для решения геодезических задач на поверхности земного эллипсоида и в пространстве, по организации геодезического мониторинга для выявления опасных деформационных процессов, об основных системах координат, применяемых в геодезии;
- сформировать умения по выполнению геодезических работ при создании, развитии, реконструкции и математической обработке государственной геодезической сети, сетей специального назначения с целью обеспечения объектов исходными геодезическими данными;
- сформировать навыки овладения современными высокоточными средствами измерения и вычислительной техники.

Изучение курса «Высшей геодезии» позволит студентам-геодезистам в последующем перейти к изучению таких дисциплин, как «Геодезическая астрономия», «Прикладная геодезия», «Геоинформационные системы и технологии», а студентам-землеустроителям иметь представление о роли государственной геодезической сети в решении геодезических и землеустроительных задач и ведении кадастра.

Большое значение в изучении высшей геодезии имеет самостоятельная работа обучающихся. Она имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, подготовку к предстоящим занятиям и зачёту по дисциплине, а также формирование навыков умственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний.

Для эффективной организации самостоятельной работы над учебным материалом целесообразно придерживаться следующих рекомендаций.

1. Ознакомиться с учебной литературой (учебниками и учебными пособиями):

- познакомиться со структурой, запомнить рубрикацию разделов, приложений, определить к каким разделам дисциплины относится тот или иной фрагмент источника, выделить материал, не вошедший в структуру дисциплины;
- ознакомиться с введением и сформировать свое мнение о содержимом источника.

2. Ввести в память своего персонального компьютера программы и справочную литературу (например, переписать их с компьютера преподавателя).

3. При работе над конкретным разделом дисциплины:

- проработать по учебникам и учебным пособиям нужный раздел и имеющиеся к нему приложения;
- постараться понять соответствующий учебный материал на концептуальном уровне;
- поработать с приложениями: предметным и именным указателями, указателем иностранных слов, толковым словарем;
- совершить «экскурсию» по Интернет;
- при наличии электронного конспекта и/или презентации по данной теме, использовать их;
- при возникновении неясностей в рассматриваемом разделе – задать вопрос преподавателю при личной встрече или по Интернету.

4. Решить предлагаемые в разделе задачи, взяв их из задачника; при заочном обучении решения задач пересылать преподавателю через Интернет.

5. По мере продвижения вперед не забывать регулярно «оглядываться назад», повторяя содержание пройденного материала; это позволит составить образное представление о структуре дисциплины, её логичной целостности.

Содержание

1. Ретроспектива развития геодезических знаний	10
1.1 Хронология развития геодезических знаний	10
1.2 Проблемы современного этапа развития геодезии в России	12
2. Геометрия земного эллипсоида	14
2.1 Объект, предмет и задачи высшей геодезии	14
2.2 Эллипсоидальная и геоцентрическая прямоугольные системы координат	16
2.3 Топоцентрическая система координат	19
3. Решение геодезических задач на поверхности эллипсоида. Дифференциальные формулы	22
3.1 Понятие о решении главных геодезических задач на поверхности земного эллипсоида	22
3.2 Решение прямых и обратных задач по способу Бесселя	23
3.3 Дифференциальные формулы	24
4. Проекция Гаусса	26
4.1 Общие сведения о геодезической системе координат	26
4.2 Сущность равноугольных проекций	27
4.3 Основы теории конформного изображения поверхности эллипсоида на плоскость	28
4.4 Сущность и свойства проекции Гаусса	29
4.5 Вычисление сближения меридианов в проекции Гаусса	33
4.6 Вычисление масштаба изображения в проекции Гаусса	33
4.7 Поправки в направление и длину геодезической линии	34
5. Общеземная и референцная системы координат	36
5.1 Общеземная система координат	36
5.2 Государственные системы координат России	38
5.3 Референчные системы координат	40
6. Методы развития геодезических сетей. Триангуляции и трилатерации	42
6.1 Понятие о триангуляции	42

6.2 Работы по построению триангуляции	44
6.3 Уравнительные вычисления в триангуляции	45
6.4 Общие понятия о трилатерации	46
6.5 Уравнительные вычисления в трилатерации	47
7. Метод полигонометрии	50
7.1 Полигонометрические хода	50
7.2 Порядок уравнивания полигонометрического хода	52
8. Государственная геодезическая сеть Российской Федерации	57
8.1 Назначение государственной геодезической сети	57
8.2 Структура и точность государственной геодезической сети по состоянию на 1995 год	58
8.3 Системы отсчета координат и времени	59
8.4 Основные принципы развития государственной геодезической сети	61
9. Государственная нивелирная сеть Российской Федерации	64
9.1 Общие положения	64
9.2 Планирование нивелирных работ	65
9.3 Особые случаи нивелирования I и II класса	66
9.4 Технические средства выполнения нивелирных работ	67
10. Основы теории потенциала	69
10.1 Сила притяжения и ее потенциал	69
10.2 Потенциал силы тяжести	70
11. Нормальное гравитационное поле Земли	74
11.1 Нормальный и возмущающий потенциал	74
11.2 Нормальная Земля.	75
Фундаментальные геодезические постоянные	75
12. Аномалии силы тяжести. Астрономо-гравиметрическое нивелирование	78
12.1 Аномалии и редукции силы тяжести	78
12.2 Уклонения отвесных линий	80

12.3	Астрономо-гравиметрическое нивелирование	81
13.	Основы теории высот	83
13.1	Общие соображения	83
13.2	Понятие о геоиде и квазигеоиде	83
13.3	Ортометрические, нормальные, и динамические высоты	85
14.	Государственная гравиметрическая сеть Российской Федерации	88
14.1	Общие положения	88
14.2	Государственная фундаментальная гравиметрическая сеть	89
14.3	Государственная гравиметрическая сеть 1 класса	91
15.	Современные методы решения задач высшей геодезии	94
15.1	Геометрический метод космической геодезии	94
15.2	Динамический метод космической геодезии	94
15.3	Спутниковое нивелирование	95
15.4	Лазерная локация Луны	97
15.5	Радиоинтерферометрия	98
16.	Спутниковые навигационные системы	99
16.1	Назначение спутниковых систем	99
16.2	Состав системы	99
16.2.1	Подсистема космических аппаратов	99
16.2.2	Подсистема контроля и управления	100
16.2.3	Навигационная аппаратура потребителей	101
16.3	Принцип работы спутниковой системы	101
16.4	Построение глобальной геодезической сети	102
16.5	Построение континентальных геодезических сетей	103
16.6	Построение государственной геодезической сети России на основе спутниковых технологий	103
17.	Ретроспектива расширения знаний о фигуре и размерах Земли	106
17.1	Земной шар	106
17.2	Сфероид	106
17.3	Геоид. Гравиметрический метод изучения фигуры Земли	107

18. Теоретические основы установления и распространения систем координат	111
18.1 Проекция Гаусса	111
18.2 Методы создания государственной геодезической сети	112
18.3 Государственная нивелирная сеть Российской Федерации	113
18.4 Высокоточная гравиметрическая сеть Российской Федерации	114
18.5 Современные методы изучения формы, размеров и внешнего гравитационного поля Земли	115
Словарь терминов	117
Словарь персоналий	128
Список рекомендуемой литературы	132
Основная литература	132
Дополнительная литература	132

1. Ретроспектива развития геодезических знаний

1.1 Хронология развития геодезических знаний

В исторической ретроспективе развитие геодезических знаний происходило неравномерно, периоды бурного роста чередовались временами застоя. Смена периодов застоя и развития совершается в соответствии с законом эволюции, а полный цикл обновления знаний по времени близок к 52 годам.

До первой половины 19 века геодезия обслуживала интересы собственно картографии и фактически была ее приложением. Необходимость знаний о размерах и фигуре Земли возрастала по мере развития транспортных сообщений, строительных машин и механизмов, да и вообще технических средств. Прорыв в одной или нескольких областях научных знаний благотворно сказывался на геодезическом приборостроении, порождая новые технологии, которые в свою очередь выводили геодезические измерения на новые уровни точности, масштабности и производительности. Массовая востребованность в геодезических знаниях в эпоху научно-технических революций, совершенствование геодезической техники и технологий привели к обособлению геодезического труда, появлению учебных заведений, готовящих специалистов геодезического профиля. Характерной особенностью труда геодезистов является тот факт, что результатом их деятельности является информация, имеющая непреложное значение во времени. Информация о форме и размерах Земли, ее гравитационном поле, пространственном расположении природных и техногенных объектов и их свойствах, динамике изменения всего упомянутого во времени лежит в основе устойчивого развития территорий. Поэтому геодезические знания должны должным образом систематизироваться, храниться и пополняться.

К реформам в сфере геодезии следует, безусловно, отнести период правления Петра I, когда в России появляются первые геодезические приборы, а карта приобретает измерительные свойства, зарождаются технологии астрономических определений и развития геодезических сетей, открывается школа морских и навигационных наук, приглашаются для работы видные иностранные ученые астрономы и геодезисты, формируются как в военной, так и в гражданской сферах учреждения и структуры,

основной целью которых является получение геопространственных данных.

Ко второму, с точки зрения периодизации, этапу реформ относится период правления Екатерины Великой. Делами геодезии ведал М.В.Ломоносов, возглавляя Географический департамент Академии наук. Именно его начинаниями формируются принципы гравиметрических определений, организуются экспедиции с целью определения астрономических координат по всей территории России.

Положительно сказались на развитии геодезии и реформы Александра I, где немалую роль сыграл и его отец Павел I. История Корпуса военных топографов отмечает, что Павел тот час же после восшествия на престол обратил внимание на плохое состояние карт в России и повелел собрать все картографические материалы в канцелярии графа Чернышева. Систематизация данных материалов позволила произвести качественный анализ состояния геодезических знаний и выявить направления развития.

При Александре I были созданы первые отечественные геодезические приборы, получили штатное расписание подразделения геодезического профиля, начаты работы по построения государственной геодезической сети под руководством Ф.Ф.Шуберта, а также проложение самого протяженного в мире ряда триангуляции (дуги Струве) под началом К.И. Теннера. Важным моментом стало учреждение Корпуса военных топографов и Военно-топографического училища, пережившего Октябрьскую революцию, советскую власть и сгинувшего в 2006 году.

Преобразования Александра II имели далеко идущие благотворные последствия. Большую роль в развитии геодезии и топографии сыграл талантливый военный министр А.Д. Милютин. Пришло осознание, что геодезические знания нужны не только для целей картографии, но и развития транспорта, строительства линейно-протяженных объектов, точного установления границ землевладений. Повышаются требования к точности определения координат, особенно высот, триангуляция приобретает массовый характер.

В первые годы советской власти происходит дальнейшее совершенствование геодезической деятельности. Создается Высшее геодезическое управление (в дальнейшем Главное управление геодезии и картографии), которое полностью берет на себя вопросы создания высокоточной геодезической сети в государст-

венном масштабе. Широкий размах получили фотограмметрия, гравиметрические работы, триангуляция и высокоточное нивелирование.

Итогом грандиозных работ стало утверждение системы координат СК-42.

Колоссальный прорыв в изучении формы и размеров Земли был связан с запуском первого искусственного спутника в 1957 году. Модернизация государственной системы координат стала приоритетным направлением космической геодезии. Роль высшей геодезии в обеспечении безопасности государства, развитии воздушных сообщений и космоса несоизмеримо возросла.

На начало 21 века пришелся очередной этап научно-технической революции. Точную оценку данного периода даст его величество Время.

1.2 Проблемы современного этапа развития геодезии в России

На начало 21 века пришелся очередной этап научно-технической революции. Спутниковые системы определения местоположения стали преобладать в геодезических определениях и по точности, и по массовости. Автоматизация геодезического приборостроения сделала геодезические работы доступными в плане их выполнения даже для непрофессионалов, которые буквально наводнили геодезическое производство с низу до верху. Кажущаяся простота геодезических определений, затянувшийся экономический и финансовый кризис обусловили проведение мероприятий, направленных на оптимизацию всего геодезического производства, продолжающегося и по сей день. Ранее существовавшая отрасль геодезии и картографии в лице Главного управления геодезии и картографии (ГУГ и К) перестала существовать, а функции данного органа были возложены в усеченном виде на Росреестр. Государство фактически самоустранилось от решения проблем высшей геодезии. Печальным финалом стала реорганизация Центрального научно-исследовательского института геодезии и картографии имени Ф.Н.Красовского в 2013 г., в результате которой была уничтожена его самостоятельность. Законы о геодезии и картографии стали создаваться людьми, безнадежно далекими от геодезических знаний. Геодезия и картография из наук превратились в «области отношений», а организация выполнения сложнейших научно-технических работ возложена

на отдельного аттестованного геодезиста. Переход к рыночной экономике вверг в хаос не только науку, но и образование, систему отечественного приборостроения, которая фактически перестала существовать. Современное отечественное спутниковое оборудование, тахеометры, гравиметры перестали конкурировать с зарубежными аналогами и просто исчезли. Гордость российской геодезии – государственная геодезическая сеть, морально устарела и модернизируется с явным опозданием от мировых тенденций. Призрачные надежды на всеобщность спутниковых определений тормозит развитие традиционных методов определения координат. При этом стандартизация технологических процессов, связанных с передовыми методами геодезических определений, вообще находится вне поля зрения Росреестра. Так наиболее востребованный вид работ, как крупномасштабная съемка местности, до сих пор выполняется по инструкции 1982г. издания. Стройная система государственных и ведомственных фондов разрушена и готова рухнуть вовсе. Понимания фондов, как источников развития, нет на всех уровнях власти. Технологии геодезических работ заимствуются, порой бездумно, у зарубежных коллег. Выхода из тупиковой ситуации в ближайшее время на государственном уровне не предвидится.

Основные надежды с выходом отрасли из кризиса связаны с созданием профессиональных сообществ, объединенных в систему саморегулирования. Первые годы существования саморегулируемых организаций в строительной отрасли, проектировании и изысканий, где роль геодезических знаний велика, показали острую необходимость дебиюрократизации государственной системы управления. Проблемы технического перевооружения, совершенствования нормативной базы, подготовки кадров, развития управленческих структур и фондов геодезических материалов могут быть решены только профессиональными сообществами.

2. Геометрия земного эллипсоида

2.1 Объект, предмет и задачи высшей геодезии

Высшая геодезия – это наука, занимающаяся изучением формы и размеров Земли, ее внешнего гравитационного поля, разработкой методов создания государственных (фундаментальных) геодезических сетей. Объектом высшей геодезии является Земля, а предметом – методы определения ее формы и размеров, внешнего гравитационного поля.

Задачи высшей геодезии:

- изучение фигуры (формы и размеров) и гравитационного поля Земли по данным геодезических и гравиметрических измерений, астрономических определений и наблюдений искусственных спутников Земли;

- создание высокоточной государственной геодезической сети, обеспечивающей определение плановых координат, государственной высотной (нивелирной) сети, а также высокоточной гравиметрической сети, дающей абсолютные значения ускорения силы тяжести;

- разработка и совершенствование методов высокоточных измерений (линейных, угловых, нивелирования, астрономических определений, наблюдений ИСЗ, гравиметрических);

- разработка методов математической обработки результатов высокоточных измерений и выполнении этой обработки.

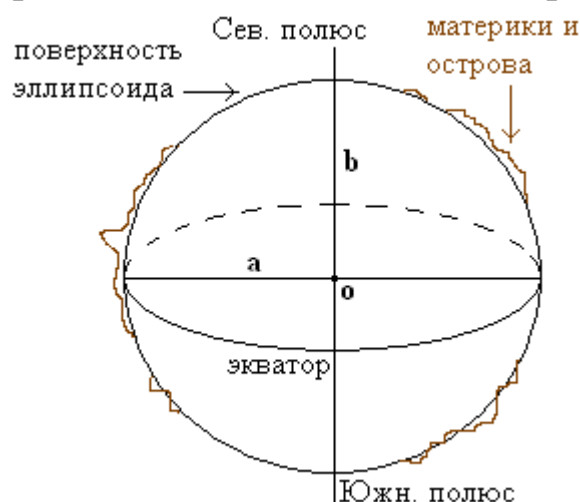


Рис. 2.1. Земной эллипсоид

В курсе геодезии задача определения координат точек поверхности Земли решается на плоскости, а в качестве основной

принята соответственно плоская прямоугольная Декартова система координат. Редуцирование измерений с физической поверхности Земли на плоскость производится в проекции Гаусса.

Для решения задач высшей геодезии представление Земли в виде плоскости явно недостаточно, если не абсурдно. По мере постановки практических и научных задач, востребованности общественным развитием более точных знаний о пространственном положении точек земной поверхности, росло и представление о фигуре и размерах Земли: от плоскости к шару; от шара к сфероиду; от сфероида к геоиду. Геоид, совпадая с поверхностью морей и океанов, а на их долю приходится 75% поверхности Земли, вместе с тем не является математической поверхностью и решение на нем геодезических задач невозможно. Для решения таких задач взамен поверхности геоида принимают поверхность эллипсоида вращения – близкой по форме геоиду, но математически правильной поверхности, на которую можно перенести результаты измерений, выполненных на физической поверхности Земли.

Земной эллипсоид (рис. 2.1) характеризуют двумя основными параметрами: большой полуосью a и малой полуосью b . Дополнительным параметром является величина, называемая сжатием:

$$\alpha = (a - b) / a .$$

Земной эллипсоид наилучшим образом аппроксимирует Землю в целом, а для представления отдельных территорий и стран применяются референц-эллипсоиды, сущность которых будет рассмотрена ниже.

Для решения геодезических и картографических задач в нашей стране и ряде других стран с 1946 года за математическую модель Земли принят референц-эллипсоид Красовского (по фамилии русского ученого, руководившего соответствующими измерительными работами) с параметрами

$$a = 6378245 \text{ км}, \quad b = 6356863 \text{ км}, \quad \alpha = 1/298.3.$$

Несмотря на появление новейших определений общеземного эллипсоида, более точно характеризующего Землю в целом, практическая значимость эллипсоида Красовского сохраняется и в настоящее время.

2.2 Эллипсоидальная и геоцентрическая прямоугольная системы координат

Системы координат, у которых начало совмещено с центром Земли или с точкой, с ним ассоциированной, называют геоцентрическими. Рассмотрим основные геоцентрические системы координат.

Центром эллипсоидальной системы координат является центр земного эллипсоида.

Принято считать, что центром Земли является центр её масс (точка равновесия). Определение его точного положения в той или иной системе координат стало возможным благодаря появлению спутниковых технологий. Эллипсоид, центр которого совпадает с центром масс Земли, а малая полуось совпадает с осью вращения Земли, называют общеземным эллипсоидом. Система координат, соотнесенная с таким эллипсоидом, является общеземной.

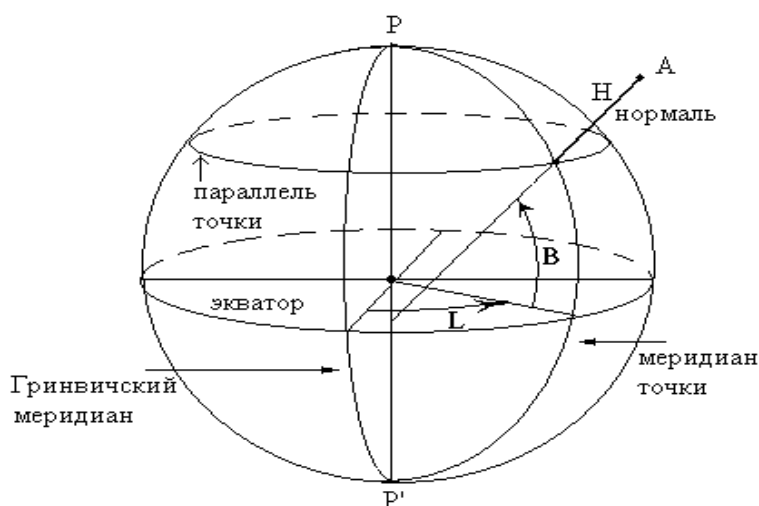


Рис. 2.2. Эллипсоидальная система координат

В случаях, когда центр эллипсоида не совпадает с центром масс Земли, но малая полуось параллельна оси вращения Земли, эллипсоид называют референц-эллипсоидом. Система координат в таком случае носит название референцной.

По поверхности эллипсоида можно проложить линии: меридианы и параллели (рис. 2.2). Меридиан получается сечением поверхности эллипсоида плоскостью, в которой лежит малая полуось. Форма меридиана - эллипс. Параллель получается сечением поверхность эллипсоида плоскостью, перпендикулярной малой полуоси. Форма параллели - окружность. Если в данной плоско-

сти лежит центр эллипсоида, получается параллель, называемая экватором, а сама плоскость называется плоскостью экватора.

В этой системе, часто называемой геодезической, наиболее важным меридианом является меридиан, проходящий через обсерваторию в Гринвиче, находящейся в восточной части Лондона. Он называется Гринвичским меридианом и служит началом счета долгот.

Предположим, что необходимо описать координаты точки A (рис. 2.2). Через эту точку проведем нормаль (перпендикуляр) к поверхности эллипсоида. Нормаль продолжается до пересечения с малой полуосью, при этом она пересекает плоскость экватора. Угол, под которым нормаль пересекает плоскость экватора, есть геодезическая широта B точки A . Она измеряется в угловой мере - в градусах, минутах и секундах дуги от плоскости экватора к северу (в северном полушарии) или к югу (в южном полушарии).

Широты точек в северном полушарии могут принимать значения от 0° на экваторе до 90° Северном полюсе. Широты точек в южном полушарии имеют отрицательное значение, то есть могут принимать значения от 0° на экваторе до -90° на Южном полюсе.

Длина одного градуса по широте - величина переменная из-за сжатия эллипсоида. Её примерное значение - 111 км. Соответственно, длина дуги в $1'$ - примерно 1850 м, длина дуги в $1''$ - около 30 м.

Через точку A и малую полуось можно построить плоскость меридиана точки A . Соответственно, через Гринвичский меридиан можно построить плоскость Гринвичского меридиана. Двугранный угол между этими плоскостями есть *геодезическая долгота* L точки A . Она так же, как и широта, измеряется в угловой мере, то есть в градусах, минутах и секундах дуги. Долготы отсчитываются от Гринвичского меридиана на восток. Долгота точки может принимать значения от 0° до 360° .

Третья координата – геодезическая высота H , отсчитываемая по нормали от физической поверхности Земли до эллипсоида. Это линейная величина и измеряется в метрах. Если точка A вне эллипсоида – высота положительная, если внутри эллипсоида – отрицательная.

Геодезическая система координат применяется при решении геодезических задач на поверхности эллипсоида, значения долгот и широт отображены на картах.

В географии и морской навигации используют похожие географические координаты. Их отличие от геодезических координат состоит том, что:

- широты указываются не со знаком плюс или минус, а указывается, что широта северная или южная;
- долгота отсчитывается от Гринвичского меридиана на восток и на запад в пределах от 0° до 180° и указывается, что долгота восточная или западная.

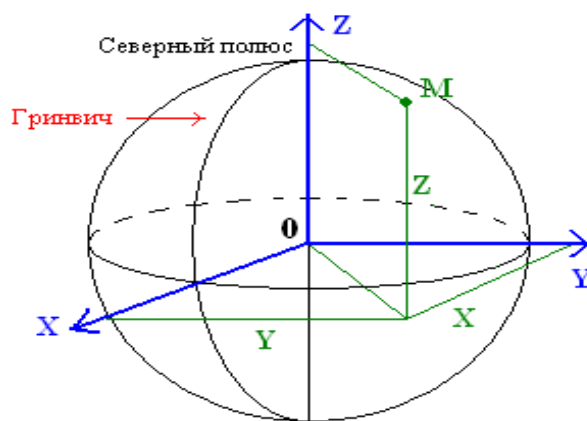


Рис. 2.3. Геоцентрическая прямоугольная система координат

Центром геоцентрической прямоугольной системы координат (рис. 2.3) также является центр земного эллипсоида. По малой оси эллипсоида проложена ось Z . При этом в северном полушарии значения аппликаты положительные, в южном полушарии – отрицательные. Через точку пересечения Гринвичского меридиана и экватора проложена ось X . Ось Y перпендикулярна двум другим осям и направлена в восточное полушарие.

Таким образом, положение любой точки в пространстве, например M , может быть описано тремя координатами: X , Y и Z . Эта система координат чаще всего используется для позиционирования объектов в околоземном пространстве, например, искусственных спутников Земли.

Координаты точки в пространственной прямоугольной системе координат и разных системах (рис. 2.4) связаны между собой соответствующими математическими формулами:

$$X = (N + H) \cos B \cdot \cos L$$

$$Y = (N + H) \cos B \cdot \sin L$$

$$Z = (N + H - N \cdot e^2) \cdot \sin B$$

где N – радиус кривизны в первом вертикале:

$$N = a(1 - e^2 \sin^2 B)^{-1/2};$$

e^2 - первый эксцентриситет эллипса:

$$e^2 = (a^2 - b^2)a^{-2}.$$

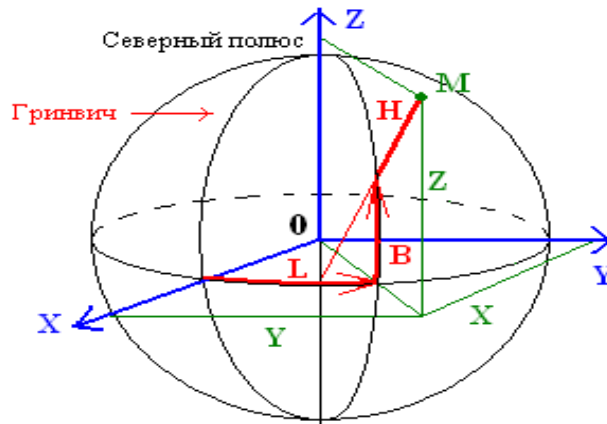


Рис. 2.4. Соотношение систем координат

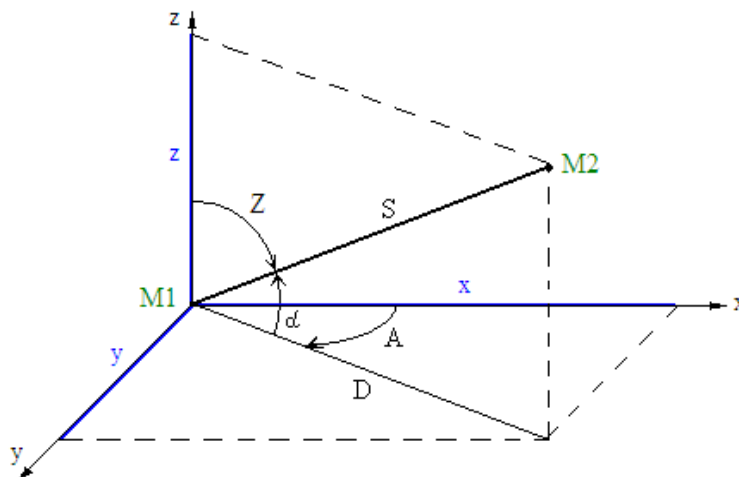


Рис. 2.5. Топоцентрическая система координат

2.3 Топоцентрическая система координат

Иногда удобно за начало системы координат выбрать, например, точку стояния наблюдателя или геодезического прибора. В случаях, когда начало системы координат находится в произвольно выбранной точке, систему координат называют *топоцентрической*. Топоцентрические системы удобны для описания взаимного положения объектов. Они всегда, тем или иным образом, связаны с геоцентрическими системами и являются вспомогательными для решения конкретных геодезических задач.

На рис. 2.5 показана прямоугольная топоцентрическая система координат. В точке **M1** находится центр системы. Из него

вверх проложена ось z . В зависимости от используемой геоцентрической системы координат, она может совпадать или с отвесной линией, или с нормалью к поверхности эллипсоида. Ось x направлена на «север». Понятие «севера» также зависит от используемой геоцентрической системы координат. Например, она может лежать в плоскости меридиана. Ось y перпендикулярна двум другим осям и направлена на восток.

Таким образом, координаты произвольной точки $M2$ относительно описанной системы задаются координатами x , y и z . Все они могут быть как положительными, так и отрицательными.

Кроме прямоугольной системы топоцентрических координат, используется полярная топоцентрическая, или просто полярная система координат. В ней положение точки $M2$ описывается координатами: зенитным расстоянием Z , «азимутом» A , расстоянием s (рис. 2.6).

Зенитное расстояние Z – угловая величина, отсчитываемая от оси z до направления на точку $M2$. Зенитное расстояние может принимать значения от 0° (строго вверх) до 180° (строго вниз). «Азимут» A (название условное) – угловая величина, отсчитываемая от оси x до плоскости, в которой лежат ось z и направление на точку $M2$. Эта величина изменяется в пределах от 0° до 360° . Расстояние s – это расстояние от начала координат до точки $M2$. Оно измеряется в метрах.

В некоторых системах координат в качестве дополнительных величин используют горизонтальное проложение D и угол наклона α (рис. 2.5). Горизонтальное проложение D – это проекция линии $M1-M2$ на плоскость xy , а угол наклона α – это угол между горизонтальной плоскостью и линией $M1-M2$. Очевидно, имеют место следующие соотношения:

$$D = s \cdot \sin Z \quad , \quad \alpha = 90^\circ - Z \quad .$$

Из последней формулы следует, что угол наклона линии над плоскостью горизонта положителен, под горизонтом – отрицателен.

На рис. 2.6 показана топоцентрическая система на поверхности эллипсоида. За начало координат принята точка 1 . Она соединена с точкой 2 кратчайшей по поверхности эллипсоида линией. Ее называют геодезической линией. Положение точки 2 относительно точки 1 задают двумя координатами:

- геодезическим азимутом A , отсчитываемым от меридиана до геодезической линии;
- длиной геодезической линии S .

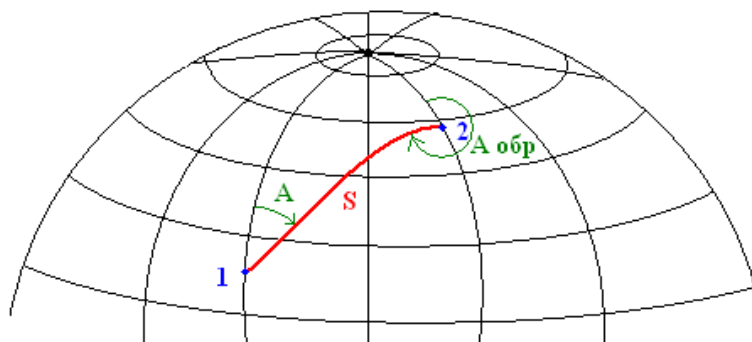


Рис. 2.6. Топоцентрическая система на поверхности эллипсоида

Геодезическая линия - это такая кривая на поверхности, в каждой точке которой главная нормаль совпадает с нормалью к поверхности.

В геодезии решение задач по определению взаимного положения точек на земной поверхности выполняется с помощью построения на ней геометрических фигур (обычно треугольников) и вычисления числовых значений элементов этих фигур. Для этого нужно решить, каким образом соединять точки поверхности земного эллипсоида. Различные попытки построить теорию сфероидической геодезии на основе применения нормальных сечений успеха не имели, так как формулы в этом случае получаются весьма сложными.

Чтобы не иметь дела с двойственностью нормальных сечений, геометрические фигуры можно образовать либо хордами этих сечений, либо геодезическими линиями. В сфероидической геодезии точки на поверхности эллипсоида соединяются геодезическими линиями. Геодезическая линия на поверхности эллипсоида играет ту же роль, что и прямая на плоскости или дуга большого круга на шаре: соединяет две точки по кратчайшему расстоянию. Введение геодезической линии устраняет неопределенность в построении геодезических фигур на поверхности земного эллипсоида и приводит к однозначности решения задачи.

Геодезическая линия на поверхности эллипсоида в общем случае (при азимутах 0, 90, 180 и 270 градусов) делит угол между взаимными нормальными сечениями в отношении 1:2 и располагается ближе к прямому нормальному сечению.

3. Решение геодезических задач на поверхности эллипсоида. Дифференциальные формулы

3.1 Понятие о решении главных геодезических задач на поверхности земного эллипсоида

В геодезии, при определении координат или их функций на плоскости, существуют две главные геодезические задачи: прямая и обратная.

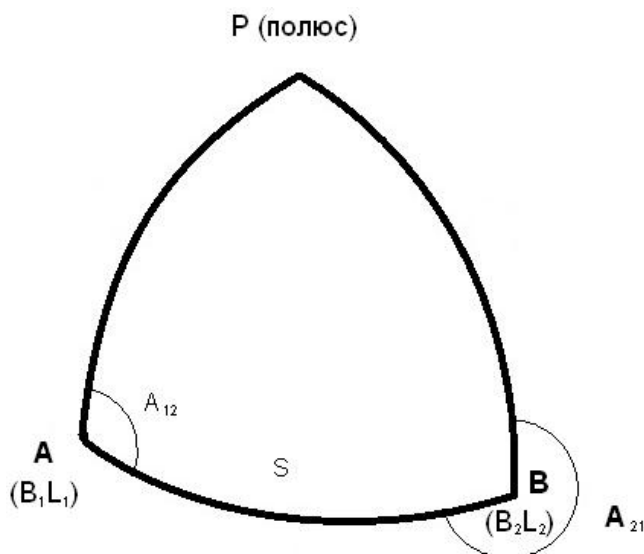


Рис.3.1. К решению главных геодезических задач на эллипсоиде

В прямой геодезической задаче на плоскости даны координаты x_1 и y_1 первой точки, дирекционный угол α направления с точки 1 на точку 2 и расстояние между ними d_{1-2} . Необходимо определить координаты второй точки x_2, y_2 .

В обратной геодезической задаче по координатам конечных точек отрезка или прямой линии, необходимо вычислить ее длину d_{1-2} и дирекционный угол α .

На эллипсоиде в сферической геодезии также рассматриваются две главные геодезические задачи.

Прямая геодезическая задача: даны B_1, L_1 (широта и долгота точки), длина геодезической линии S , азимут линии в точке A (A_{12}). Необходимо определить B_2, L_2 , а также обратный азимут A_{21} .

Обратная геодезическая задача на сфероиде: даны B_1, L_1, B_2, L_2 . Найти длину геодезической линии S , а также азимуты A_{12} и A_{21} .

Способ решения главной геодезической задачи на эллипсоиде зависит в основном от длины геодезической линии. Длина геодезической линии бывает:

- малой (до 45 км);
- средней (до 600 км);
- большой (до 5000 км);
- сверхбольшой (до 20000 км).

Решение главной геодезической задачи на малые и средние расстояния осуществляется способами Гаусса и Шрейбера. На больших расстояниях решение осуществляется способом Бесселя.

Все геодезические задачи решаются вне зависимости от длины геодезической линии с высокой точностью. Широты и долготы должны вычисляться с точностью $0'',0001$, азимуты с точностью $0'',001$. Соответственно длина S должна быть задана с точностью до 1 мм.

С математической точки зрения решение главных геодезических задач на поверхности эллипсоида можно рассматривать как преобразование полярных координат в геодезические и геодезические - в полярные, как решение полярных сфероидических треугольников, как интегрирование дифференциальных уравнений геодезической линии.

3.2 Решение прямых и обратных задач по способу Бесселя

Этот способ предназначен для решения задач на любые расстояния, т.е. до 20000 км. В основе способа лежит прямой путь решения геодезических задач, в котором непосредственно определяются искомые величины: в прямой задаче – широта и долгота второй точки и азимут направления со второй точки на первую; в обратной задаче - прямой и обратный азимут и расстояние между точками. Надо помнить, что в отличие от плоской геодезии на эллипсоиде прямой и обратный азимут имеют некоторое отличие. Вначале осуществляется переход с эллипсоида на шар, затем прямая и обратная геодезические задачи решаются на шаре, потом с введением поправок получают решение на сфероиде. Переход с эллипсоида на шар осуществляется с учетом условий Бесселя, которые состоят в следующем:

геодезическая линия эллипсоида S на шаре изображается дугой большого круга σ ;

в соответствующих точках геодезической линии и дуги большого круга азимуты равны, т.е. $A = \alpha$;

широта точки на шаре равна приведенной широте соответствующей точке на эллипсоиде, т.е.

$$\varphi = u.$$

Переход от геоцентрической широты к геодезической осуществляется по формуле

$$\tan u = (1 - \alpha) \tan B.$$

При решении главных геодезических задач долгое время использовались таблицы, надобность в которых отпала с появлением первых компьютеров.

3.3 Дифференциальные формулы

Под дифференциальными формулами в высшей геодезии подразумевают те, которые устанавливают зависимости между малыми (дифференциальными) изменениями исходных и определяемых величин при решении главных геодезических задач на поверхности эллипсоида, а также зависимости между дифференциальными изменениями параметров земного эллипсоида и геодезических координат точек пространства.

Дифференциальные формулы имели большое значение вплоть до широкого внедрения высокоскоростной вычислительной техники. Так после уравнивания обширной геодезической сети могло оказаться, что один из исходных пунктов имеет существенную ошибку, которая должна быть исправлена повторным уравниванием. На это требовались месяцы и большие финансовые затраты. Более оптимальным просматривалось решение, когда поправки в уравненные значения определяемых пунктов вносились не в результате общего переуравнивания, а путем установления дифференциальных формул для геодезической линии на поверхности эллипсоида, которые называются дифференциальными формулами первого рода.

Другая задача связана с проблемой установления более точных параметров референц-эллипсоида, и, как следствие, переуравниванием всей геодезической сети, так как геодезические пункты получают новые значения координат. Это задача установления взаимосвязи двух систем координат. Прямой путь перевы-

числения координат пунктов в масштабе государства экономически нецелесообразно. В этом случае вычисляют поправки в координаты пунктов за разности параметров и ориентировки старого и нового эллипсоидов по дифференциальным формулам для системы геодезических координат, которые носят название дифференциальными формулами второго рода, совместно с дифференциальными формулами для геодезической линии.

4. Проекция Гаусса

4.1 Общие сведения о геодезической системе координат

Основным требованием при выборе системы координат является простота ее использования при решении практических задач геодезии. Также она должна быть единой, то есть однозначно определять положение точки на плоскости или в пространстве, для достаточно больших участков поверхности Земли.

Одной из самых распространенных систем на поверхности сферы и эллипсоида является система геодезических координат, основным достоинством которой является небольшое отличие геодезических координат B и L от астрономических φ и λ , которые определяются независимо от геодезических построений из наблюдений небесных тел:

$$\begin{aligned}\varphi - B &= \xi, \\ \lambda - L &= \eta \sec \varphi,\end{aligned}$$

где ξ и η - составляющие уклонения отвеса в меридиане и в первом вертикале, которые могут быть определены по гравиметрическим данным.

Другим преимуществом геодезической системы координат является ее единство для всей поверхности эллипсоида, поэтому она находит широкое применение для решения задач высшей геодезии. Геодезическая система координат служит основой для перехода к любой другой системе координат, в ней решаются задачи на большие расстояния, обрабатываются большие массивы астрономо-геодезических данных.

Вместе с тем геодезической системе координат присущи и недостатки. Взаимное положение пунктов определяется в угловых единицах (градусах, минутах, секундах широт и долгот, тогда как расстояния между пунктами измеряются и задаются в линейной мере. Кроме того угловые единицы для широт и долгот в пунктах с различными широтами имеют разное линейное значение (убывают от экватора к полюсу).

Направления меридианов не параллельны между собой, а от них отсчитываются геодезические азимуты и дирекционные углы. Особое неудобство вызывает применение геодезических координат при создании и использовании топографических карт и планов, на которых плановое положение объектов должно опи-

сываться угловыми величинами, а высоты – линейными. Угловая мера не дает однозначного восприятия и площади объекта, что очень важно в кадастровой деятельности.

Таким образом, возникает необходимость введения дополнительной системы координат, свободной от указанных недостатков. В качестве такой во многих странах мира используется система плоских прямоугольных координат Гаусса.

4.2 Сущность равноугольных проекций

Прямоугольные координаты были впервые введены в науку французским ученым Декартом в 1637 г. В геодезии их впервые применил французский ученый Кассини в 1734 г., а к эллипсоиду вращения в 30-х годах 19 в. - немецкий ученый Зольднер.

Плоские прямоугольные координаты просты в понимании пространственного положения точек, легко решаются задачи по вычислению длин линий и направлений.

Вместе с тем такая система координат не имеет глобального характера и применяется для ограниченных участков земной поверхности из-за невозможности избежать искажений при отображении поверхности эллипсоида на плоскость. Это главный недостаток плоской прямоугольной системы координат.

Общая теория отображения одной поверхности на другую основана на использовании функции комплексной переменной. Сущность применяемых в геодезии отображений состоит в том, что каждой точке поверхности эллипсоида вращения соответствует только одна точка плоскости, причем при постоянном передвижении точки по поверхности эллипсоида соответствующая ей точка на плоскости перемещается по определенному закону и непрерывно. Такое отображение носит название картографической проекции.

В геодезии и землеустройстве наибольшее распространение получили равноугольные проекции, в которых сохраняется подобие бесконечно малых фигур. Подобие фигур подразумевает равенство углов, но не длин линий и площадей. Геодезические линии эллипсоида изображаются на плоскости в равноугольных проекциях в виде сложных кривых, практическое использование которых весьма затруднительно. Поэтому изображение геодезической линии на плоскости заменяется прямой – хордой, соединяющей конечные точки этого изображения. Отсюда возникает

задача – вычисление угла между изображением геодезической линией и хордой, т.е. вычисление поправки за кривизну изображения геодезической линии.

Главным свойством равноугольных проекций является независимость линейных искажений от азимута. Масштаб изображения в этих проекциях в каждой точке зависит только от координат этой точки и не зависит от направления. Из этого свойства вытекает равенство углов и подобия бесконечно малых фигур.

Общая теория конформного изображения одной поверхности на другую была разработана немецким геодезистом Гауссом в 1825 г. Частным случаем этой теории является геодезическая и картографическая задача – изображение поверхности эллипсоида вращения на плоскости. Если принять сжатие земного эллипсоида равным нулю, т. е. считать Землю шаром, то проекция Гаусса обращается в равноугольную поперечно – цилиндрическую проекцию Ламберта – Гаусса.

4.3 Основы теории конформного изображения поверхности эллипсоида на плоскость

Во многих случаях геодезической практики измерения производятся между точками, удаленными друг от друга на весьма малые расстояния, во много раз меньше радиуса земного шара. В таких случаях для численной обработки геодезических измерений и для определения взаимного положения точек земной поверхности вместо поверхности эллипсоида гораздо проще и практически удобнее использовать плоскость. С этой целью поверхность эллипсоида изображают на плоскости по соответствующим математическим правилам.

Теория и практика применения различных изображений (проекций) поверхности земного эллипсоида на плоскости изучается в математической картографии. Из множества картографических проекций в геодезии в настоящее время применяют только конформные (равноугольные) проекции. В конформных проекциях углы между линиями на поверхности при изображении этих линий на плоскости не изменяются, а масштаб в данной точке изображения не зависит от направления. Отсутствие угловых искажений не является главным преимуществом конформных проекций перед не конформными. Дело в том, что геодезические линии эллипсоида изображаются на плоскости в виде кривых

сложного вида, и практическое использование таких кривых весьма затруднительно. Поэтому изображение геодезической линии на плоскости заменяют прямой линией - хордой, соединяющей конечные точки этого изображения. Отсюда возникает дополнительная задача - вычисление угла между изображением геодезической линии и хордой. Наиболее существенное преимущество конформных проекций - это независимость масштаба конформного изображения от направления в данной точке. Это свойство конформных проекций позволяет гораздо проще, чем в других проекциях, учитывать линейные искажения при выполнении геодезических и топографических работ.

4.4 Сущность и свойства проекции Гаусса

Наиболее распространённой проекцией, применяемой в геодезии, является проекция Гаусса-Крюгера (рис. 4.1). В ней проецирование земной поверхности производится в пределах некоторой выделенной зоны. В этой проекции зона проецирования представляет собой фрагмент земной поверхности, простирающийся от полюса до полюса и ограниченный с востока и запада меридианами. Касание проективной плоскости с проектируемой сферой происходит по центральному меридиану зоны. Его называют осевым.

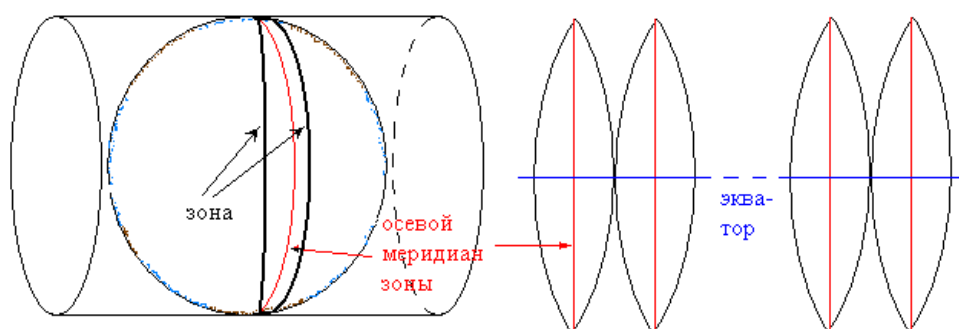


Рис. 4.1. Проекция Гаусса-Крюгера

Существуют формулы перерасчета координат точки из эллипсоидальных (широты B и долготы L) в координаты в проекции Гаусса-Крюгера и наоборот. Эти формулы как раз изучаются в курсе высшей геодезии. Рабочие формулы вычисления плоских прямоугольных координат Гаусса x и y по геодезическим координатам B и L получаются на основе уравнений, оп-

ределяющих закон отображения точек эллипсоида на плоскость в проекции Гаусса:

$$x = X - \frac{l^2}{2} \frac{d^2 X}{dq^2} + \frac{l^4}{24} \frac{d^4 X}{dq^4} - \frac{l^6}{720} \frac{d^6 X}{dq^6} + \dots;$$

$$y = l \frac{dX}{dq} - \frac{l^3}{6} \frac{d^3 X}{dq^3} + \frac{l^5}{120} \frac{d^5 X}{dq^5} - \dots$$

Задача состоит в нахождении производных $\frac{d^n X}{dq^n}$.

В приведенных формулах :

- q, l – изометрические координаты точки на эллипсоиде;
- X – длина дуги меридиана от экватора до точки;
- x и y – плоские прямоугольные координаты (тоже изометрические) изображаемой точки на плоскости.

Изометрические координаты q, x отсчитываются от экватора, а l, y – от осевого меридиана.

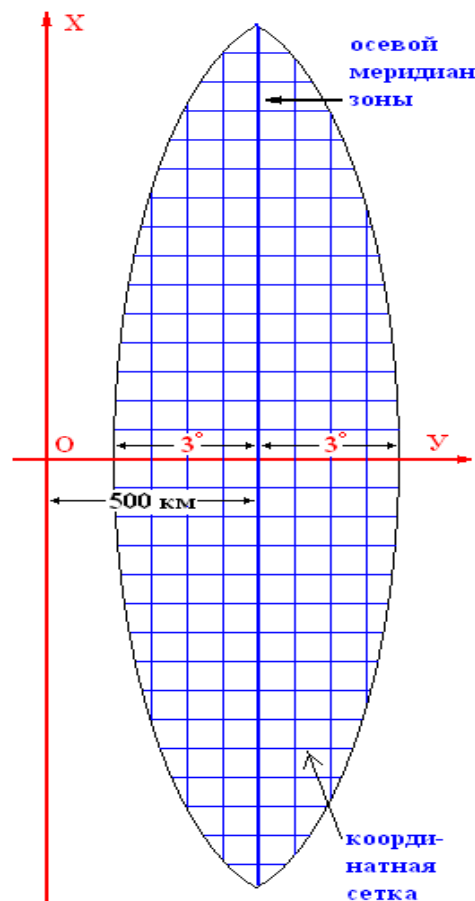


Рис 4.2. Пример системы координат в проекции Гаусса-Крюгера

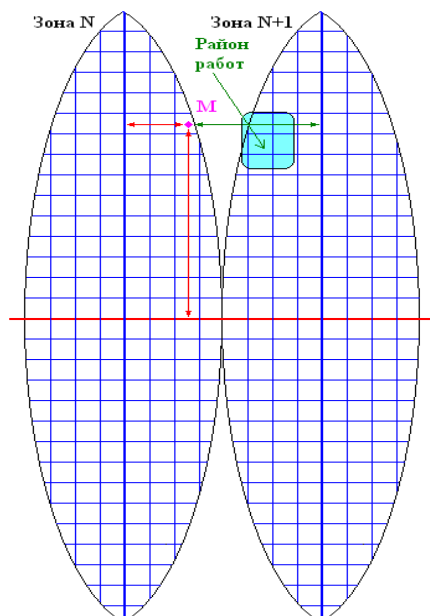


Рис. 4.3. Работа в смежных зонах

Система координат в проекции Гаусса-Крюгера является плоской прямоугольной (рис. 4.2). На рисунке, для примера, приведена шестиградусная зона проецирования, а для наглядности, в пределах зоны нанесена координатная сетка. Ось y совпадает с проекцией экватора. Для удобства, с тем, чтобы координаты по оси y были положительными во всей зоне, начало системы координат отнесено на запад на 500 км. Ось x направлена параллельно проекция осевого меридиана зоны. Если необходимо спроецировать участок Земли, превышающий по размеру размер выделенной зоны, то проецирование производится на несколько смежных зон. В некоторых случаях геодезические работы могут выполняться на границе смежных зон проецирования (рис. 4.3). При этом возникают дополнительные затруднения.

В проекции Гаусса-Крюгера угловые искажения минимизированы. Следовательно, она является *конформной*. Что касается линейных искажений, то на осевом меридиане они равны нулю, но по мере удаления от него они увеличиваются (рис. 4.4).



Рис. 4.4.. Возрастание линейных искажений к краям зоны проецирования

Ширина зоны проецирования устанавливается, исходя из допустимых линейных искажений на краю зоны. При использовании проекции Гаусса-Крюгера необходимо указывать долготу осевого меридиана и параметры используемого земного эллипсоида.

Для того чтобы не было разнобоя в работе геодезистов и потребителей геодезической информации, конкретная система координат закрепляется законодательно.

Основной системой координат в проекции Гаусса-Крюгера является «Система координат 1995 года», или СК-95. Она является дальнейшим развитием системы СК-42. Основные характеристики этих систем достаточно близки:

- вся поверхность Земли проецируется на 60 зон;
- зоны нумеруются от 1 до 60;
- ширина каждой зоны проецирования - 6° ;
- смещение начала координат по оси y – 500 км на запад;
- у первой зоны долгота западного меридиана 0° , осевого меридиана - 3° , восточного - 6° .

Для отличия координат точки, задаваемых в одной зоне от точно таких же координат, но задаваемых в другой зоне, к значению ординаты y в старшие разряды приписывают номер зоны. Например, если указано, что $y = 32\ 334\ 456\ м$, то точка находится в 32-й зоне.

По долготы точки легко определить, в какой зоне она находится. Для этого достаточно разделить долготу точки на 6 и округлить полученный результат до большего.

Если указан номер зоны N , то долготу осевого меридиана зоны L_0 можно вычислить по формуле

$$L_0 = N \cdot 6^\circ - 3^\circ .$$

Различие между системами СК-42 и СК-95 состоит в расположении и ориентировке используемого земного эллипсоида или эллипсоида Красовского.

Для производства крупномасштабных топографических и кадастровых съёмок, а также обеспечения строительства большинства объектов используют системы координат, установленных для отдельных регионов в законодательном порядке. Примерами таких систем являются:

РСК-47 - для Северо-Западного региона;

СК-64 - для Санкт-Петербурга и некоторых близлежащих городов и поселений;

СК-63 - для Ленинградской области.

Во всех этих системах ширина зон проецирования составляет 3° .

4.5 Вычисление сближения меридианов в проекции Гаусса

Сближение меридианов используется для перехода от азимута геодезической линии эллипсоида к дирекционному углу ее изображения на плоскости.

Для приближенных расчетов полезно помнить выражение:

$$\gamma = (L - L_0) \sin B,$$

где L, L_0 соответственно долготы исходной точки и осевого меридиана зоны, а B - широта исходной точки. Можно заметить, что сближение меридианов γ в данной проекции имеет максимальное значение на краю зоны при $B \rightarrow 90^\circ$. На полюсе пересекаются все меридианы, в том числе, и осевой, поэтому здесь не может существовать понятия сближения меридианов.

4.6 Вычисление масштаба изображения в проекции Гаусса

Частный масштаб длин (масштаб) имеет большое значение в геодезических проекциях и является одной из их численных характеристик. Масштаб служит для вычисления поправок в длины геодезических линий эллипсоида при вычислении длины их изображений на плоскости. На практике чаще известны плоские прямоугольные координаты точек, для которых необходимо знание масштаба:

$$m = 1 + \frac{y^2}{2R^2} + \frac{y^4}{24R^4} .$$

Здесь: m – масштаб изображения, y – ордината точки (удаление от осевого меридиана), R – средний радиус кривизны. Анализируя полученную формулу, замечаем, что линии равных масштабов и равных линейных искажений (изоколы) проходят симметрично и практически параллельно изображению осевого меридиана, так как значение среднего радиуса кривизны R незначительно изменяется с изменением широты.

4.7 Поправки в направление и длину геодезической линии

Для перехода от длины и направления изображенной на плоскости проекции геодезической линии эллипсоида к длине и направлению ее хорды необходимо вводить поправки за кривизну ее изображения. Рассмотрим рисунок 4.5.

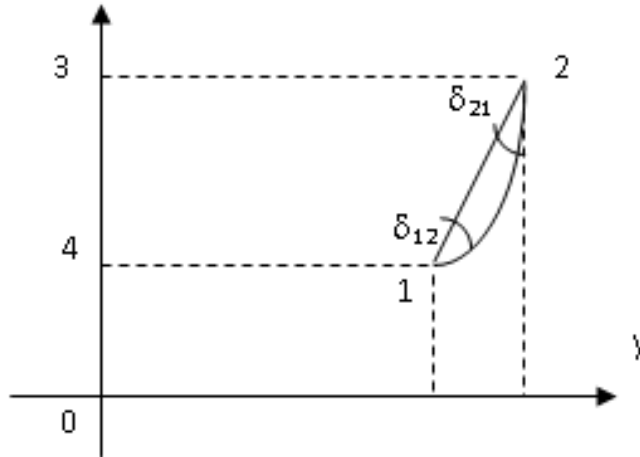


Рис. 4.5. Искажение при проецировании направления

На рисунке имеем изображение геодезической линии эллипсоида на плоскости в виде кривой 1-2. Углы между этой кривой и ее хордой являются искомыми поправками. Прямые линии 1-4 и 2-3 являются изображениями геодезических линий, проходящих на поверхности эллипсоида через точки 1 и 2 перпендикулярно осевому меридиану. Поскольку проекция конформна, углы изображаются без искажений. На поверхности эллипсоида сумма внутренних углов трапеции 1234 больше 360° на величину сферического избытка, а на плоскости – на величину поправок. Следовательно, можем записать равенства:

$$\delta_{12} - \delta_{21} = -\varepsilon; \quad \delta_{12} = -\delta_{21} = -\varepsilon/2.$$

Сферический избыток вычисляется по формуле

$$\varepsilon'' = \rho'' \frac{P}{R^2},$$

где P – площадь трапеции, R – радиус сферы. Площадь трапеции равна произведению полусуммы оснований $y_m = (y_2 + y_1)/2$ на ее высоту $\Delta x = (x_2 - x_1)$.

Полезно знать предельные значения поправок, которые будут иметь место на краю координатной зоны для направления, параллельного осевому меридиану. Для шестиградусной зоны имеем $y_{max} = 320\text{км}$, в триангуляции 1 класса будет $\Delta x_{max} = S_{max} = 30\text{км}$ и значение поправки не превзойдет величины $\delta_{max} \approx 24''$.

Рассчитаем поправку в длину геодезической линии за масштаб ее изображения на плоскость в проекции Гаусса. В результате получаем для максимального значения поправки в относительной мере:

$$\frac{d - S}{S} = \frac{\Delta S}{S} \approx \frac{y_{\max}^2}{24R_m^4} S_{\max}$$

Для шестиградусной зоны и триангуляции 1 класса при ранее принятых значениях получаем величину не более 10^{-10} . Таким образом, поправка пренебрегаемо мала и может не учитываться во всех случаях геодезической практики.

5. Общеземная и референцная системы координат

5.1 Общеземная система координат

Решение множества разнообразных научных и прикладных задач с последующим картографированием земной поверхности предопределяет ввод геодезических систем координат: общеземных – планетарных и референцных – локальных для отдельных территорий и государств.

Геоцентрическая система координат, отнесенная к общему земному эллипсоиду, называется общеземной системой координат.

Общеземная координатная система используется для решения и картографирования глобальных задач: изучения фигуры Земли, внешнего гравитационного поля, изменения во времени движения полюсов Земли, неравномерности ее вращения, управления полетами летательных аппаратов (в т.ч. космических). В этой связи создают модель планеты Земля – трехосный эллипсоид вращения, имеющий размеры, массу, угловую скорость и др. параметры, весьма близкие к реальности. Их называют фундаментальными. К ним также относят скорость распространения электромагнитных волн в вакууме.

Для ориентирования указанной системы координат в теле Земли ее начало помещают в центр масс Земли, начальный меридиан совмещен с меридианом Гринвича, а ось вращения направляют на северный условный полюс (фиксированный в среднем его положении).

Таким образом, положение общего земного эллипсоида в теле Земли в целом фиксируется условиями выбора параметров Нормальной Земли, а именно:

- центр уровенного эллипсоида должен совпадать с центром масс Земли, а его главная ось инерции – с осью вращения Земли;
- угловая скорость вращения должна быть одинаковой для реальной Земли и уровенного эллипсоида;
- масса уровенного эллипсоида должна быть равна массе реальной Земли;
- вторые зональные гармонические коэффициенты должны совпадать;
- нормальный потенциал силы тяжести на поверхности уровенного эллипсоида должен быть равен реальному потенциалу

силы тяжести на уровенной поверхности, проходящей через начальный пункт нивелирования.

Положение точки, определяемой как центр масс Земли, достаточно устойчиво. По оценке профессора И.Д. Жонголовича для ее смещения в теле Земли на один сантиметр потребовалось бы переместить на поверхности Земли материк 10 на 10 экваториальных радиусов и высотой 10 км. Следовательно, выбор центра масс Земли в качестве начала общеземной системы координат отвечает требованиям минимального изменения во времени координат пунктов земной поверхности. Кроме того, в такой системе координат упрощается решение задач космической геодезии, так как плоскость мгновенной орбиты искусственного спутника Земли или околоземного небесного объекта всегда проходит через центр масс Земли.

С повышением требований к точности геодезических данных необходимо учитывать возможное перемещение начала системы координат в теле Земли. Причинами изменения положения центра масс могут быть сезонные перемещения атмосферных масс и грунтовых вод, а также перемещение масс внутри Земли, вызванные воздействием на Землю внешних сил: притяжения Луны и Солнца. По форме общеземная система координат может быть эллипсоидальной и пространственной прямоугольной, последняя из которых является наиболее удобной и широко распространенной

Положение полярной оси Z_0 такой системы координат номинально соответствует направлению на средний полюс в эпоху 1900-1905гг., называемому Международным условным началом движения полюса.

Положение оси X_0 (начало счета долгот) в общеземной системе координат определяют по международной договоренности. Так с 1884г. За международное начало счета долгот принималась плоскость Гринвичской обсерватории, относительно которой были определены долготы многих национальных долготных пунктов, в том числе и нашей Пулковской обсерватории. Со временем Гринвичская обсерватория потеряла свое исключительное значение, а в 1959 г. была перенесена за черту Лондона примерно на 10 км.

В настоящее время начало счета долгот реализуется косвенными методами, как результат долготных наблюдений на службах времени, которые сотрудничают в рамках Международного

бюро времени. Начало счета долгот соответствует точке на экваторе вблизи Гринвичского меридиана и не зависит от положения полюса.

5.2 Государственные системы координат России

Государственные системы координат в настоящее время установлены постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. номер 1463:

- геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) - для использования при осуществлении геодезических и картографических работ;

- общеземная геоцентрическая система координат "Параметры Земли 1990 года" (ПЗ-90.11) - для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

Система геодезических координат 1995 года (СК-95), установленная постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. N 568 в качестве единой государственной системы координат, и единая система геодезических координат 1942 года (СК-42), введенная постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. N 760, применяются до 1 января 2017 г. в отношении материалов (документов), созданных с их использованием.

В единых государственных системах координат применяются следующие числовые геодезические параметры:

- фундаментальные геодезические постоянные, а также параметры общего земного эллипсоида согласно таблице 1.

- геометрические и физические числовые геодезические параметры, утверждаемые Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии (в отношении геодезической системы координат Российской Федерации 2011 года (ГСК-2011)) и Министерством обороны Российской Федерации (в отношении общеземной геоцентрической системы координат "Параметры Земли 1990 года" (ПЗ-90.11)).

При этом ориентации координатных осей и угловая скорость единых государственных систем координат в составе числовых геодезических параметров единых государственных систем координат должны соответствовать рекомендациям Международной службы вращения Земли и Международного бюро времени.

Таблица 1 Фундаментальные геодезические постоянные, а также параметры общего земного эллипсоида, применяемые в единых государственных системах координат

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
1	2	3	4
I. Геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) 1. Фундаментальные геодезические постоянные			
Геоцентрическая гравитационная постоянная Земли (с учётом атмосферы)	fM	км ³ /с ²	398600.4415
Угловая скорость вращения Земли	ω	рад/с	$7.929115 \cdot 10^{-5}$
1	2	3	4
2. Параметры общего земного эллипсоида (началом системы координат является центр масс Земли. В качестве отсчётного эллипсоида принят общеземной эллипсоид, ось вращения которого совпадает с осью Z геодезической системы координат (ГСК-2011))			
Большая полуось	a	м	6378136.5
Сжатие	α		1/298.2564151
II. Общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11) 3. Фундаментальные геодезические постоянные			
Геоцентрическая гравитационная постоянная Земли (с учётом атмосферы)	fM	км ³ /с ²	398600.4418
Угловая скорость вращения Земли	ω	рад/с	$7.292115 \cdot 10^{-5}$
2. Параметры общего земного эллипсоида (началом системы координат является центр масс Земли. В качестве отсчётного эллипсоида принят общеземной эллипсоид, ось вращения которого совпадает с осью Z системы координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11))			
Большая полуось	a	м	6378136
Сжатие	α		1/298.25784

Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии дано поручение обеспечить создание и эксплуатацию геодезических пунктов геодезической системы координат 2011 года (ГСК-2011) и размещать на своем официальном сайте в информационно-телекоммуникационной сети "Интернет" информацию о составе, техническом оснащении и местоположении таких пунктов, за исключением информации, относящейся к государственной тайне.

Министерству обороны Российской Федерации приказано обеспечить создание и эксплуатацию геодезических пунктов общеземной геоцентрической системы координат "Параметры Земли 1990 года" (ПЗ-90.11) и размещать на своем официальном сайте в информационно-телекоммуникационной сети "Интернет" информацию о составе, техническом оснащении и местоположении таких пунктов, за исключением информации, относящейся к государственной тайне. Также Министерству обороны Российской Федерации совместно с Федеральным космическим агентством при эксплуатации глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС приказано обеспечить до 1 января 2014 г. переход к использованию общеземной геоцентрической системы координат "Параметры Земли 1990 года" (ПЗ-90.11).

Для закрепления на земной поверхности ГГКС по результатам измерений в единой системе координат определяются геодезические пункты. Совокупность геодезических пунктов на Земле образует геодезическую сеть. Современные геодезические сети создаются методами космической геодезии.

5.3 Референционные системы координат

Референционные системы координат устанавливают в отдельных регионах и государствах с помощью референц-эллипсоидов, которые лучше соответствуют им. Референц-эллипсоид ориентируют в теле Земли с помощью исходных геодезических дат (параметров, которые устанавливают значения широт, долгот и их взаимосвязь с астрономо-геодезическими координатами в некотором пункте (или их совокупности). Таким образом, установлен референц-

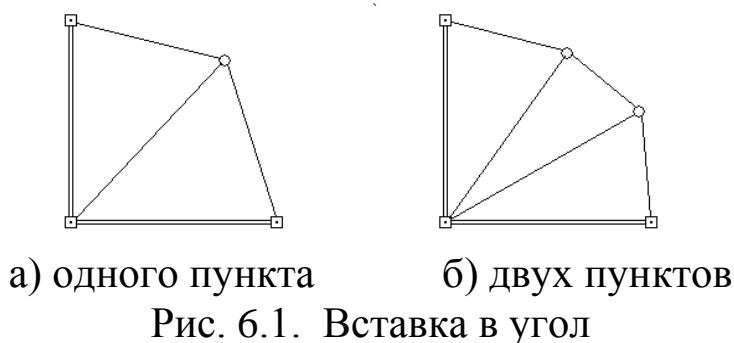
эллипсоид Красовского и введена система координат 1942 года (СК - 42).

В настоящее время в России введена референцная система координат 1995 года – СК-95 – с целью обеспечения геодезических и картографических работ.

6. Методы развития геодезических сетей. Триангуляции и трилатерации

6.1 Понятие о триангуляции

Триангуляция – метод развития геодезических сетей (передачи координат), которые состоят из геодезических пунктов, образующих треугольники с измеренными углами. Например, при наличии трёх исходных геодезических пунктов, можно определить координаты еще одного или двух геодезических пунктов. Для этого необходимо, чтобы между ними была видимость, позволяющая измерить углы в треугольниках (рис 6.1).



В частности, “вставка в угол” используется при получении пунктов 3-4 классов ГСС. И хотя в треугольнике достаточно измерить два угла, измеряются все три угла. Это позволяет выявить грубые ошибки измерений, повысить и оценить точность измерений. Вычислить координаты определяемого пункта можно из одного треугольника, используя формулы Юнга или Гаусса. Но используют всегда не менее двух треугольников.

Если вычислены координаты определяемого пункта (пунктов), то они становятся исходными. От них можно определять следующие определяемые пункты, создавая сплошную сеть треугольников (рис. 6.2).

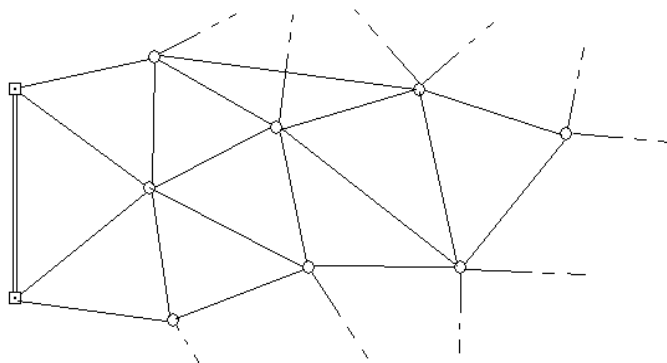


Рис. 6.2. Сплошная сеть триангуляции

В виде сплошных сетей строились сети АГС 2 класса. В отдельных случаях сеть триангуляции строится в виде ряда (рис. 6.3). Ряды триангуляции использовались при создании сетей 1 класса АГС.

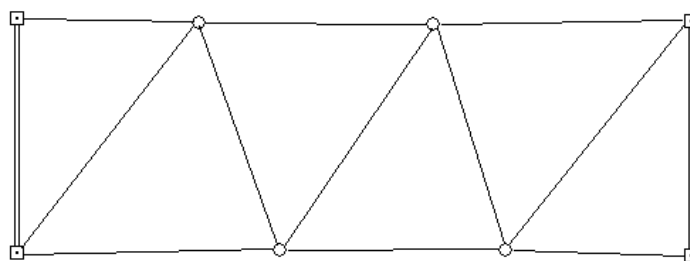
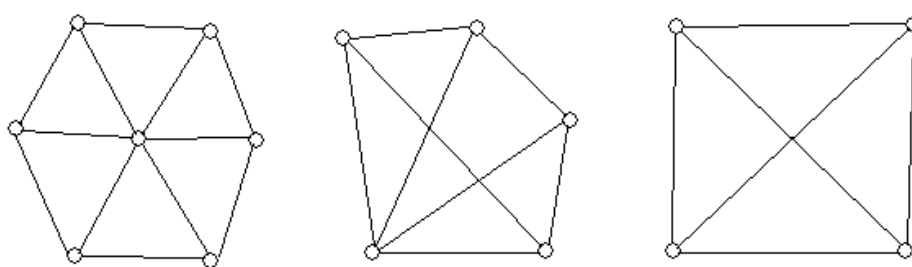


Рис. 6.3. Ряд триангуляции



- а) центральная система
 б) «веер»
 в) геодезический четырёхугольник

Рис. 6.4. Фигуры построения триангуляции

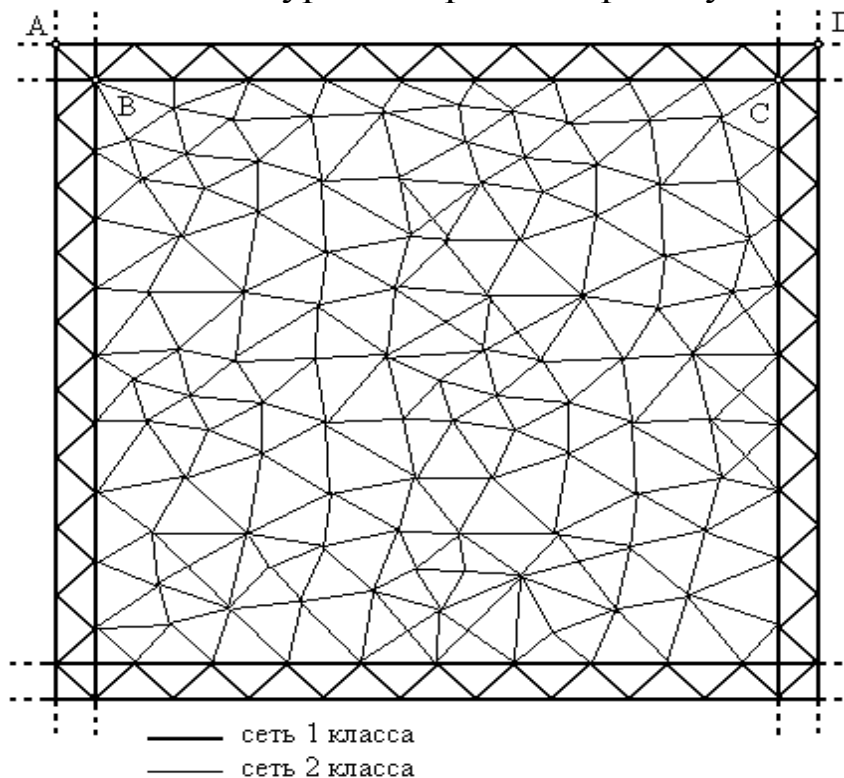


Рис. 6.5. Схема построения АГС

При развитии сетей методом триангуляции, кроме треугольников, выделяют и такие фигуры построения, как центральная система, «веер», геодезический четырёхугольник (рис.6.4)

При создании геодезических сетей самой высокой точности в построениях в виде треугольников или других фигур, измеряют углы, и длины сторон. Такие сети называют линейно-угловыми.

АГС 1-2 классов в основном была создана с использованием метода триангуляции. На рис. 6.5 показано, что триангуляция 1 класса развивалась в виде рядов, а триангуляция 2 класса - в виде сплошной сети.

6.2 Работы по построению триангуляции

Построение геодезической сети методом триангуляции включает полевые и камеральные работы.

К первым относятся: 1) рекогносцировка; 2) постройка знаков; 3) измерение углов; 4) определение элементов приведения. Если сеть создается автономно (свободная сеть), то к перечисленным видам работ прибавляются: 5) измерение базиса; 6) определение азимута выходной стороны (базиса); 7) определение координат исходного пункта.

Перед выполнением полевых работ проводятся проверки и исследования применяемых в работе инструментов.

В период камеральных работ выполняется: 1) проверка полевых журналов; 2) уравнивание на станции наблюдений; 3) предварительные вычисления: решение треугольников и вычисление предварительных значений координат; вычисление сферических избытков и поправок за кривизну изображения геодезической линии на плоскости в проекции Гаусса; вычисление поправок за центрировку и редукцию; 4) вычисление сводок приведенных и плоских направлений; 5) уравнивательные вычисления; 6) окончательное решение треугольников и вычисление координат определяемых пунктов; 7) составление каталога координат, схемы сети и отчета по работам.

В настоящее время триангуляция в чистом виде применяется крайне редко. В структуре геодезического обеспечения потребностей государства с начала 21 века стали доминировать спутниковые методы, где наибольший прогресс получили навигационные системы. Вместе с тем сложные инженерные сооружения, типа атомных электростанций, гидроэлектростанций, тон-

нелей метро, ускорителей элементарных частиц, где требуется наивысшая точность, триангуляция является незаменимой эффективной.

6.3 Уравнительные вычисления в триангуляции

Помимо простоты в организации работ и высокой эффективности несомненным достоинством триангуляции является наличие в сетях с измеренными углами большого числа избыточных измерений, что позволяет и оценить точность построений, и повысить точность как измеренных величин, так и их функций. Детально уравнительные вычисления рассматриваются в дисциплине «Теория математической обработки измерений». Здесь лишь отметим, что уравнивание осуществляется под условием минимума суммы квадратов поправок в измеренные величины, что с учетом весов измерений имеет вид:

$$\sum p v^2 = \min.$$

Реализация данного условия производится двумя способами: кореллат и параметрическим.

В первом способе реализуются геометрические зависимости, возникающие в сети триангуляции, простейшими из которых являются условия фигур. Так, в плоском треугольнике сумма углов должна быть равна 180° . Из-за ошибок измерений данное условие не соблюдается, что приводит к появлению невязки W , устранение которой и составляет цель уравнительных вычислений.

Во втором способе, называемом параметрическим, также устанавливаются зависимости, но уже между измеренными величинами и координатами (поправками в координаты) определяемых пунктов. Так, назначив приближенные координаты определяемого пункта, можно вычислить расстояние от него до одного из исходных пунктов из решения обратной задачи. Если измерено расстояние между этими пунктами, то оно не совпадет с вычисленным как ввиду неточного знания координат определяемого пункта, так и в меньшей мере, ввиду ошибок измерений. Каждая измеренная величина дает одно параметрическое уравнение, поэтому число уравнений в параметрическом способе гораздо больше, чем в кореллатном способе. Данное обстоятельство сдерживало применение параметрического способа, так как урав-

нивание сетей триангуляции в государственном масштабе даже по отдельным полигонам требовало совместного решения тысяч уравнений. Вместе с тем корреллатный способ плохо поддается алгоритмизации, что и обусловило его уход на второй план с появлением электронных вычислительных машин.

6.4 Общие понятия о трилатерации

Трилатерация представляет собой сплошную сеть примыкающих один к другому треугольников, в которых измеряют длины всех сторон; два пункта, как минимум, должны иметь известные координаты (рис.6.6). Решение первого треугольника трилатерации, в котором известны координаты двух пунктов и измерены две стороны, можно выполнить по формулам линейной засечки, причем нужно указывать справа или слева от опорной линии АВ располагается пункт 1.

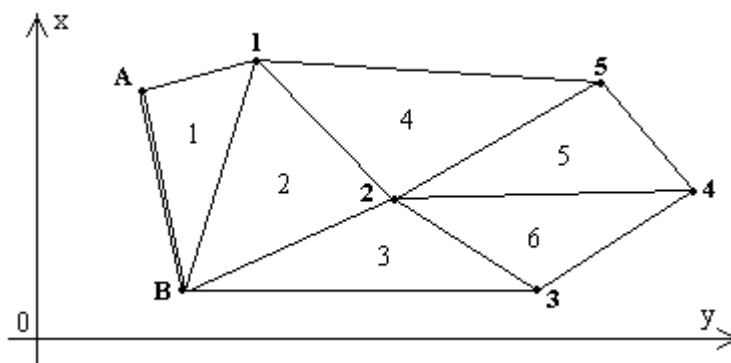


Рис.6.6. Схема сплошной сети трилатерации.

Во втором треугольнике также оказываются известными координаты двух пунктов и длины двух сторон; его решение тоже выполняется по формулам линейной засечки, вычисляются координаты пункта 2, и так далее.

Можно поступить и по-другому: сначала вычислить углы первого треугольника по теореме косинусов, затем, используя эти углы и дирекционный угол стороны АВ, вычислить дирекционные углы сторон А1 и В1 и решить прямую геодезическую задачу от пункта А на пункт 1 и от пункта В на пункт 1. Таким образом, в каждом отдельном треугольнике «чистой» трилатерации нет избыточных измерений и нет возможности выполнить контроль измерений, уравнивание и оценку точности; на практике кроме сторон треугольников приходится измерять некоторые дополнительные элементы и строить сеть так, чтобы в ней возникали гео-

метрические условия. Уравнивание сплошных сетей трилатерации выполняется на ЭВМ по программам, в которых реализованы алгоритмы МНК. Данный метод, как и метод триангуляции, предусматривает создание на местности геодезических сетей либо в виде цепочки треугольников, геодезических четырехугольников и центральных систем, либо в виде сплошных сетей треугольников, в которых измеряются не углы, а длины сторон. В трилатерации, как и в триангуляции, для ориентирования сетей на местности должны быть определены азимуты ряда сторон. По мере развития и повышения точности свето- и радиодальномерной техники измерений расстояний метод трилатерации постепенно приобретает все большее значение, особенно в практике инженерно-геодезических работ. При создании государственных геодезических сетей 1—2 классов метод трилатерации не применялся. Это объясняется следующими причинами. Контроль измерения расстояний при построения сетей трилатерации слишком слаб, а иногда и вовсе отсутствует, что недопустимо в точных геодезических построениях. В самом деле, например, в треугольнике с измеренными сторонами контроль измерения расстояний полностью отсутствует, так как в треугольнике не возникает ни одного условного уравнения. В геодезическом четырехугольнике и центральной системе с измеренными сторонами возникает всего лишь по одному условному уравнению, в то время как в таких же фигурах триангуляции с измеренными углами возникает во много раз больше независимых условных уравнений: в геодезическом четырехугольнике четыре, а в центральной системе еще больше. 2. В технико-экономическом отношении метод трилатерации также уступает методу триангуляции. При прочих равных условиях штат бригады при линейных измерениях и транспортные расходы в несколько раз больше, чем при угловых измерениях, поскольку приходится на конце каждой измеряемой с пункта линии устанавливать отражатель, а затем при переезде со светодальномером на другой пункт перевозить всех рабочих с отражателями с одних пунктов на другие, чего не требуется делать при угловых измерениях.

6.5 Уравнивательные вычисления в трилатерации

Так же, как и в триангуляции, и в полигонометрии сеть трилатерации можно уравнивать как кореллатным, так и параметри-

ческим способом. При этом в кореллатном способе на начальном этапе достаточно по измеренным сторонам вычислить углы в треугольниках трилатерации и установить зависимости в более сложных фигурах: геодезических четырехугольниках, центральных системах.

Сущность параметрического способа уравнивания заключается в следующем.

1. Устанавливают предварительные значения уравниваемых величин L' и необходимых параметров X в геодезической сети, В качестве уравниваемых величин в наземной трилатерации принимают расстояния, а в пространственных построениях – экваториальные топоцентрические координаты, топоцентрические расстояния, радиальные скорости и т. д.

За необходимые параметры обычно принимают координаты пунктов и небесных объектов.

Измерения таковы, что они имеют малые ошибки и могут быть приняты за предварительные значения L' уравниваемых величин. Особое внимание следует обратить на максимально возможное точное вычисление счислимых (определяемых) координат.

2. Устанавливают связь каждой уравниваемой величины L с необходимыми параметрами. Фундаментальное параметрическое уравнение для каждой уравниваемой величины имеет вид:

$$\Phi_i = f_i(X) - L_i = 0,$$

$$X = x_1, x_2, \dots, x_k, i = 1, 2, \dots, n.$$

Приводя нелинейную функцию Φ_i к линейному виду, получают параметрические уравнения поправок:

$$V = B\delta X + l$$

и решают их по методу наименьших квадратов с оценкой уравниваемых величин и необходимых параметров.

3. Уравнение поправок измеренного расстояния $v_\beta = -w_\beta / n$

Расстояние S_{ki} между пунктами k и i связано с координатами этих пунктов формулой

$$\Phi = \sqrt{x^2 + y^2} - s_{ki}.$$

Уравнение поправок для измеренного расстояния будет иметь вид

$$v_{ki} = -\delta s_{ki} + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_0 \delta x + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)_0 \delta y + l_{ki},$$

где частные производные

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)_0 = \cos \alpha_{ki}^0; \quad \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)_0 = \sin \alpha_{ki}^0,$$

а δs_{ki} - поправка за систематическую ошибку измеренного расстояния.

Свободный член

$$l_{ki} = s_{ki}^0 - s'_{ki},$$

где s_{ki}^0 - значение расстояния, соответствующее счислимым (предварительным) координатам пунктов.

Таким образом, уравнение поправок измеренного расстояния имеет вид:

$$v_{ki} = -\delta s_{ki} - \cos \alpha_{ki}^0 \xi_k - \sin \alpha_{ki}^0 \eta_k + \cos \alpha_{ki}^0 \xi_i + \sin \alpha_{ki}^0 \eta_i + l_{ki},$$

где

$\xi_k, \eta_k, \xi_i, \eta_i$ - поправки в координаты пунктов k и i .

Если один из пунктов является исходным, например k , то в уравнении поправок члены, содержащие ξ_k, η_k будут равны нулю. Если оба пункта k и i исходные, то уравнение поправок принимает вид:

$$v_{ki} = -\delta s_{ki} + l_{ki}.$$

Последняя формула может быть использована при эталонировании приборов на исходных сторонах.

7. Метод полигонометрии

7.1 Полигонометрические хода

Сущностной момент как при развитии разрядной сети методом полигонометрии, так и при создании государственной геодезической сети одинаков – измеряются длины сторон и углы между ними. Естественно, при развитии ГГС предъявляются повышенные точности к измерениям, особые требования к длинам сторон и ходов в целом, а также методикам наблюдений и организации работ. Так при проложении ходов не допускается трехштативная система – каждая точка стояния должна быть оформлена в виде пункта с соответствующим центром и наружным знаком в виде сигнала или пирамиды.

И так, метод полигонометрии реализуется путём проложения полигонометрического хода в виде последовательного ряда точек, в котором измеряются углы поворота на точках и расстояния между точками (рис. 7.1). Математической основой для обработки измерений является прямая геодезическая задача (ПГЗ).

В производстве работ по проложению полигонометрического хода различают три основных этапа:

- подготовительные работы;
- полевые измерения;
- камеральная обработка результатов измерений.

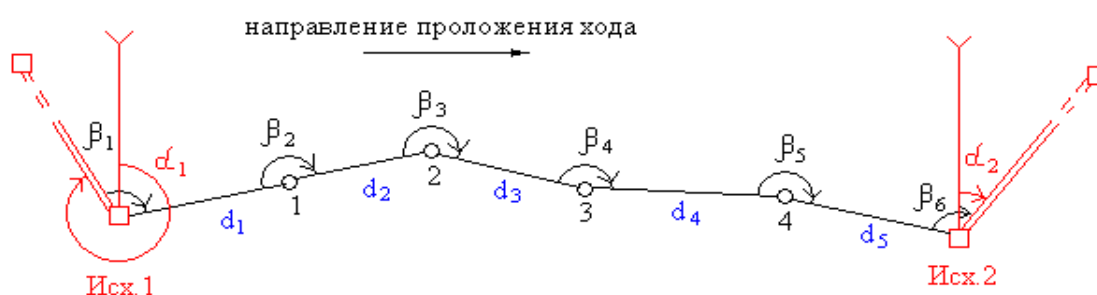


Рис. 7.1. Разомкнутый полигонометрический ход

Подготовительный этап начинается с уяснения задачи: где, в какие сроки, с какой точностью необходимо произвести проложение полигонометрического хода.

Затем производится оценка обстановки и, в первую очередь, определяется местоположение исходных и определяемых геодезических пунктов. Затем рассматриваются физико-

географические условия, влияющие на выполнение работ (наличие водных пространств, болот, возвышенностей, высота растительного покрова и т.п.), а также характеристики экономической и социальной инфраструктуры (наличие дорог, источников питьевой воды, предприятий связи, медицинских учреждений и т.п.).

В силу ряда обстоятельств, нельзя прокладывать ход любой произвольной длины и любым произвольным количеством точек поворота. Руководящие документы ограничивают эти две величины. Опираясь на эти требования, геодезист принимает решение: по каким методикам будут производиться геодезические измерения, как будут располагаться на местности точки хода, и будет ли это один ход или система ходов с одной или несколькими узловыми точками (рис. 7.2).

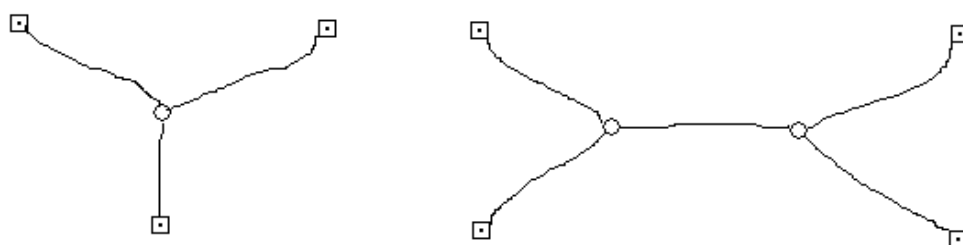


Рис. 7.2. Системы полигонометрических ходов

В силу необходимости выполнения двух разнородных измерений, углов и линий, а также учитывая залесённость территории страны, метод полигонометрии при развитии ГГС в центральных и северных районах России практически не применялся.

В конечном счёте, принимают окончательное решение и, на его основе, создают технический проект. В его состав, в частности, входят схемы проложения ходов (хода), календарный график, смета на выполнение работ.

Полевые измерения начинаются с рекогносцировки. Рекогносцировка подразумевает осмотр: исходных пунктов со вскрытием центров с целью определения их состояния, сохранности, а также местности, по которой будет проложен ход с пометкой точек хода.

Затем производят закладку постоянных центров и строительство геодезических знаков, производят собственно измерения углов поворота и длин линий. Кроме того, измеряют вертикальные углы, необходимые для приведения измеренных линий на плоскость горизонта.

В отличие от разрядной сети на каждом определяемом и исходном пунктах оформляют центрировочные листы, с целью определения элементов приведения – поправок за центрировку и редукцию.

7.2 Порядок уравнивания полигонометрического хода

Обработку наблюдений в полигонометрическом ходе производят в два этапа: предварительные и уравнивательные вычисления.

Этап *предварительных вычислений* начинают с проверки материалов полевых геодезических измерений, а именно: их полнота (все ли требуемые измерения произведены?) и качество (соблюдена ли технология производства измерений?).

После этого производят приведение измеренных длин линий и направлений на плоскость в проекции Гаусса-Крюгера. Составляется схема хода в выбранном масштабе (рис. 8.3). Производится выписка координат исходных пунктов и из решения обратных геодезических задач (ОГЗ) получают дирекционные углы примычных сторон (на рис. 8.3 это дирекционные углы Сидорово-Иваново и Петрово-Зайцево).

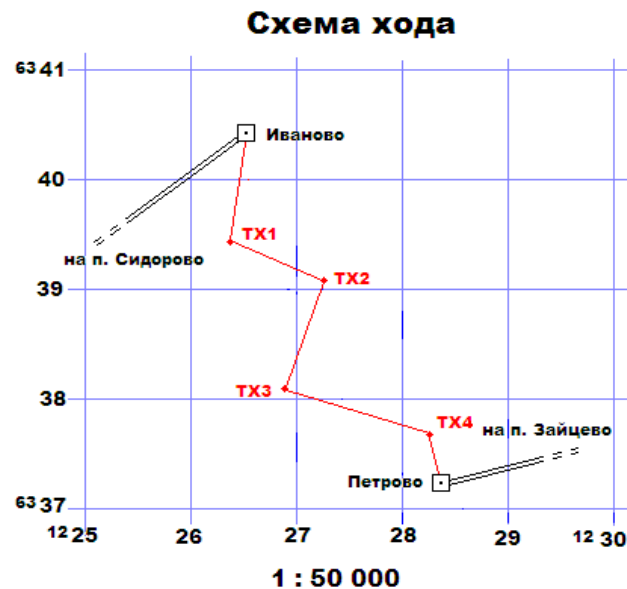


Рис. 8.3. Схема полигонометрического хода (образец)

Дальнейшие вычисления производят в следующем порядке. На первом этапе вычисляют угловую невязку. Ее появление связано с тем, что измерения углов и длин линий отягощены «есте-

ственными» ошибками. Подробно такие ошибки рассматриваются в дисциплине «Теория математической обработки измерений».

Смысл угловой невязки поясняет рис. 8.4. Если взять исходный дирекционный угол (α_1 по рисунку) и, используя измеренные углы $\beta_1 - \beta_6$, последовательно вычислять дирекционные углы сторон хода, в конечном счёте, будет вычислен дирекционный угол конечной примычной стороны ($\alpha_{выч}$ по рисунку). Из-за ошибок измерений он практически никогда не совпадает с исходным дирекционным углом (α_2 по рисунку).

Разницу, получаемую по принципу «есть» минус «должно быть», называют *угловой невязкой* и вычисляют по формуле

$$w_\beta = \alpha_{выч} - \alpha_2 .$$

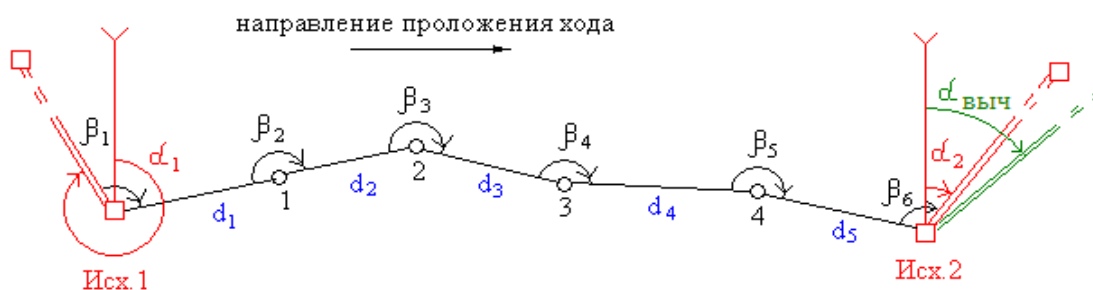


Рис. 8.4. Смысл угловой невязки

Угловая невязка характеризует точность выполненных работ. Она может быть как положительной, так и отрицательной, но не может быть любой по абсолютной величине. В руководящих документах указаны предельные значения невязки для различных случаев. Если полученная невязка превышает допуск – ход проложен с недопустимыми ошибками и углы в ходе должны быть измерены снова.

Существуют допуски и на точность в измерении линий, которые характеризуются относительными линейными невязками, вычисляемыми по формуле:

$$(w_x^2 + w_y^2)^{1/2} / D .$$

Здесь: $w_x = \sum_{i=1}^k \Delta x_i - (x_{кон} - x_{нач})$; $w_y = \sum_{i=1}^k \Delta y_i - (y_{кон} - y_{нач})$, а

D – общая длина хода.

Выражение $(w_x^2 + w_y^2)^{1/2}$ называют линейной невязкой хода.

Относительная линейная невязка приводится к виду $1 / \dots$, например, $1 / 150000$. При этом - чем больше величина знамена-

теля, тем выше качество работ. На эту величину в руководящих документах также указаны допуски. Если допуск не соблюдается, то измерения в ходе необходимо повторить.

Угловая и линейная невязки в ходе подлежат устранению. Такая процедура называется уравниванием.

При уравнивании разрядных сетей (ходов) полигонометрии применяют упрощенное уравнивание, при котором угловые и линейные невязки устраняются раздельно. Предполагается, что ошибки в измеренных углах распределяются равномерно (одинаковы в каждом измеренном углу), поэтому поправку в каждый из углов необходимо вычислить по формуле:

$$v_{\beta} = -w_{\beta} / n ,$$

где n – количество измеренных углов поворота, включая те из них, которые измерены на исходных пунктах.

В высшей геодезии, при уравнивании ГГС, происходит совместное уравнивание по методу наименьших квадратов. При этом в разомкнутом полигонометрическом ходе, опирающемся на два исходных пункта, имеются три избыточных измерения: два угла и одна линия. Эти избыточные измерения дают два условия: условие дирекционных углов и два условия координат.

Относительная линейная невязка приводится к виду $1 / \dots$, например, $1 / 150000$. При этом - чем больше величина знаменателя, тем выше качество работ. На эту величину в руководящих документах также указаны допуски. Если допуск не соблюдается, то измерения в ходе необходимо повторить.

В настоящее время для уравнивания полигонометрических ходов или их систем используются специальные пакеты программ, которые реализуют строгие методы уравнивания и дают более точные результаты чем приближенные методы.

Рассмотрим некоторые особенности уравнивания систем полигонометрических ходов (рис. 7.5). На рисунке пункты A , B и C – исходные, пункт P – узловая точка. Каждый из ходов характеризуется длиной хода D и количеством углов поворота n . Если ходы прокладываются от пунктов A , B и C и узловой точке, то точка P для этих ходов является конечным исходным пунктом. Но таковым он не является, его координаты неизвестны и нет примычного направления.

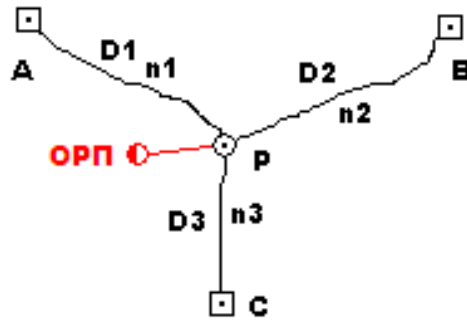


Рис. 7.5. К уравниванию системы полигонометрических ходов

Для корректного решения этой проблемы поступают следующим образом. Рядом с узловой точкой закладывают ориентирный пункт (ОРП) и угловую привязку производят на ОРП. То есть получают три значения дирекционного угла направления P - $ОРП$ ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$). Из трёх значений вычисляют так называемое средневесовое значение дирекционного угла. Для этого сначала вычисляют веса дирекционных углов из ходов:

$$p_{\alpha_1} = 1/n_1; \quad p_{\alpha_2} = 1/n_2; \quad p_{\alpha_3} = 1/n_3 .$$

После этого вычисляют значение дирекционного угла на ОРП:

$$\alpha_{ОРП} = \frac{\alpha_1 \cdot p_1 + \alpha_2 \cdot p_2 + \alpha_3 \cdot p_3}{p_1 + p_2 + p_3} .$$

Полученное значение дирекционного угла используют в качестве исходного для вычисления поправок в измеренных углах в каждом из ходов.

После того, как в ходах уравниены углы и вычислены дирекционные углы сторон, вычисляют приращения координат и координаты узловой точки P ($x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$). Окончательные координаты узловой точки также получают как средневесовые значения, но веса получают обратно пропорционально длинам ходов:

$$p_{D_1} = 1/D_1; \quad p_{D_2} = 1/D_2; \quad p_{D_3} = 1/D_3 ;$$

$$x_p = \frac{x_1 \cdot p_{D_1} + x_2 \cdot p_{D_2} + x_3 \cdot p_{D_3}}{p_{D_1} + p_{D_2} + p_{D_3}} ;$$

$$y_p = \frac{y_1 \cdot p_{D_1} + y_2 \cdot p_{D_2} + y_3 \cdot p_{D_3}}{p_{D_1} + p_{D_2} + p_{D_3}} .$$

В дальнейшем уравнивание координат в каждом ходе производят обычным порядком. Уравнивание более сложных систем полигонометрических ходов производится по более сложным схемам. Такие системы уравнивают по принципам, излагаемым в курсе «Теории математической обработки измерений».

8. Государственная геодезическая сеть Российской Федерации

8.1 Назначение государственной геодезической сети

Государственная геодезическая сеть (далее - ГГС) представляет собой совокупность геодезических пунктов, расположенных равномерно по всей территории и закрепленных на местности специальными центрами, обеспечивающими их сохранность и устойчивость в плане и по высоте в течение длительного времени.

ГГС включает в себя также пункты с постоянно действующими наземными станциями спутникового автономного определения координат на основе использования спутниковых навигационных систем с целью обеспечения возможностей определения координат потребителями в режиме, близком к реальному времени.

ГГС предназначена для решения следующих основных задач, имеющих хозяйственное, научное и оборонное значение:

- установление и распространение единой государственной системы геодезических координат на всей территории страны и поддержание ее на уровне современных и перспективных требований
- геодезическое обеспечение картографирования территории России и акваторий окружающих ее морей;
- геодезическое обеспечение изучения земельных ресурсов и землепользования, кадастра, строительства, разведки и освоения природных ресурсов;
- обеспечение исходными геодезическими данными средств наземной, морской и аэрокосмической навигации, аэрокосмического мониторинга природной и техногенной сред;
- изучение поверхности и гравитационного поля Земли и их изменений во времени;
- изучение геодинамических явлений;
- метрологическое обеспечение высокоточных технических средств определения местоположения и ориентирования.

8.2 Структура и точность государственной геодезической сети по состоянию на 1995 год

ГГС, созданная по состоянию на 1995 год, объединяет в одно целое:

- астрономо-геодезические пункты космической геодезической сети (далее - АПП КГС);
- доплеровскую геодезическую сеть (далее - ДГС);
- астрономо-геодезическую сеть (далее - АГС) 1 и 2 классов;
- геодезические сети сгущения (далее - ГСС) 3 и 4 классов.

Пункты указанных построений совмещены или имеют между собой надежные геодезические связи.

Космическая геодезическая сеть представляет собой глобальное геодезическое построение. Координаты ее пунктов определены по доплеровским, фотографическим, дальномерным радиотехническим и лазерным наблюдениям искусственных спутников Земли (далее - ИСЗ) системы геодезического измерительного комплекса (далее - ГЕОИК). Точность взаимного положения пунктов при расстояниях между ними около 1...1,5 тыс. км характеризуется средними квадратическими ошибками, равными 0,2...0,3 м.

Доплеровская геодезическая сеть представлена 131 пунктом, взаимное положение и координаты которых определены по доплеровским наблюдениям ИСЗ системы Транзит. Точность определения взаимного положения пунктов при среднем расстоянии между пунктами 500...700 км характеризуется средними квадратическими ошибками, равными 0,4...0,6 м.

Астрономо-геодезическая сеть 1 и 2 классов содержит 3,6 тысячи геодезических азимутов, определенных из астрономических наблюдений, и 2,8 тысячи базисных сторон, расположенных через 170...200 км.

Средние квадратические ошибки измерений астрономических азимутов и базисов, полученные по результатам уравнивания, соответственно равны 1,27" и 1:500000.

Точность определения взаимного планового положения пунктов, полученных в результате выполненного в 1991 году общего уравнивания АГС как свободной сети, характеризуется в собственной системе координат средними квадратическими ошибками:

- 0,02...0,04 м для смежных пунктов,

- 0,25...0,80 м при расстояниях от 500 до 9000 км.

Высоты квазигеоида над референц-эллипсоидом Красовского определены методом астрономо-гравиметрического нивелирования.

Сеть линий астрономо-гравиметрического нивелирования покрывает всю территорию страны и образует 909 замкнутых полигонов, включающих 2897 астрономических пунктов. При вычислениях превышений квазигеоида использованы данные гравиметрических съемок масштаба 1:1000000 и крупнее.

Точность определения превышений высот квазигеоида характеризуется средними квадратическими ошибками:

- 0,06...0,09 м при расстояниях 10...20 км,

- 0,3...0,5 м при расстоянии около 1000 км.

Геодезические сети сгущения 3 и 4 классов включают в себя около 300 тысяч пунктов. Эти сети созданы методами триангуляции, полигонометрии и трилатерации в соответствии с "Основными положениями о построении государственной геодезической сети СССР", 1954 и 1961 гг.

Плотность пунктов ГГС 1, 2, 3 и 4 классов, как правило, составляет не менее одного пункта на 50 кв. км.

Нормальные высоты верхних марок подземных центров пунктов ГГС определены из геометрического или тригонометрического нивелирования.

Существующая плотность ГГС при условии применения современных спутниковых и аэросъемочных технологий обеспечивает решение задач картографирования и обновления карт всего масштабного ряда до 1:500 для городов и 1:2000 для остальной территории.

8.3 Системы отсчета координат и времени

Единая государственная система геодезических координат 1995 года получена в результате совместного уравнивания трех самостоятельных, но связанных между собой геодезических построений различных классов точности: КГС, ДГС, АГС по их состоянию на период 1991 - 93 годов.

Космическая геодезическая сеть предназначена для задания геоцентрической системы координат, доплеровская геодезическая сеть - для распространения геоцентрической системы координат, астрономо-геодезическая сеть - для задания системы гео-

дезических координат и доведения системы координат до потребителей.

В результате совместного уравнивания КГС, ДГС, АГС и значений радиус-векторов пунктов построена сеть из 134 опорных пунктов ГГС, покрывающая всю территорию при среднем расстоянии между смежными пунктами 400...500 км.

Точность определения взаимного положения этих пунктов по каждой из трех пространственных координат характеризуется средними квадратическими ошибками 0,25...0,80 м при расстояниях от 500 до 9000 км.

Абсолютные ошибки отнесения положений пунктов к центру масс Земли не превышают 1 м по каждой из трех осей пространственных координат.

Эти пункты использовались в качестве исходных при заключительном общем уравнивании АГС.

Точность определения взаимного планового положения пунктов, полученная в результате заключительного уравнивания АГС по состоянию на 1995 год, характеризуется средними квадратическими ошибками:

- 0,02...0,04 м для смежных пунктов,
- 0,25...0,80 м при расстояниях от 1 до 9 тыс. км.

Положение пунктов ГГС в принятых системах задается следующими координатами:

- пространственными прямоугольными координатами X, Y, Z;
- геодезическими (эллипсоидальными) координатами B, L, H;
- плоскими прямоугольными координатами x и y, вычисляемыми в проекции Гаусса-Крюгера.

При решении специальных задач могут применяться и другие проекции эллипсоида на плоскость.

Геодезические высоты пунктов ГГС определяют как сумму нормальной высоты и высоты квазигеоида над отсчетным эллипсоидом или непосредственно методами космической геодезии, или путем привязки к пунктам с известными геоцентрическими координатами.

Нормальные высоты пунктов ГГС определяются в Балтийской системе высот 1977 года, исходным началом которой является нуль Кронштадтского футштока.

Масштаб ГГС задается Единым государственным эталоном времени - частоты - длины. Длина метра принимается в соответствии с резолюцией XVII Генеральной конференции по мерам и весам (октябрь 1983 г.) как расстояние, проходимое светом в вакууме за 1:299792458-ую долю секунды.

Типы средств измерений, применяемые при создании ГГС, включая импортируемые, должны быть утверждены, а средства измерений при выпуске из производства, после ремонта и в процессе эксплуатации должны проходить поверку в соответствии с Федеральным законом "Об обеспечении единства измерений" от 27.04.1993 N 4871-1 (с изменениями).

8.4 Основные принципы развития государственной геодезической сети

Государственная геодезическая сеть, создаваемая в соответствии с настоящими "Основными положениями", структурно формируется по принципу перехода от общего к частному и включает в себя геодезические построения различных классов точности:

- фундаментальную астрономо-геодезическую сеть (ФАГС),
- высокоточную геодезическую сеть (ВГС),
- спутниковую геодезическую сеть 1 класса (СГС-1).

В указанную систему построений вписываются также существующие сети триангуляции и полигонометрии 1...4 классов.

На основе новых высокоточных пунктов спутниковой сети создаются постоянно действующие дифференциальные станции с целью обеспечения возможностей определения координат потребителями в режиме, близком к реальному времени.

По мере развития сетей ФАГС, ВГС и СГС-1 выполняется уравнивание ГГС и уточняются параметры взаимного ориентирования геоцентрической системы координат и системы геодезических координат СК-95.

Высший уровень в структуре координатного обеспечения территории России занимает фундаментальная астрономо-геодезическая сеть. Она служит исходной геодезической основой для дальнейшего повышения точности пунктов государственной геодезической сети.

ФАГС практически реализует геоцентрическую систему координат в рамках решения задач координатно-временного обеспечения (КВО).

Все пункты ФАГС должны быть фундаментально закреплены с обеспечением долговременной стабильности их положения, как в плане, так и по высоте.

На пунктах ФАГС выполняются определения нормальных высот и абсолютных значений ускорений силы тяжести. Определения нормальной высоты производится нивелированием не ниже II класса точности, абсолютные определения силы тяжести - по программе определения фундаментальных гравиметрических пунктов.

Периодичность этих определений на пунктах ФАГС устанавливается в пределах 5...8 лет и уточняется в зависимости от ожидаемых изменений измеряемых характеристик.

Второй уровень в современной структуре ГГС занимает высокоточная геодезическая сеть, основные функции которой состоят в дальнейшем распространении на всю территорию России геоцентрической системы координат и уточнении параметров взаимного ориентирования геоцентрической системы и системы геодезических координат.

ВГС, наряду с ФАГС, служит основой для развития геодезических построений последующих классов, а также используется для создания высокоточных карт высот квазигеоида совместно с гравиметрической информацией и данными нивелирования.

ВГС представляет собой опирающееся на пункты ФАГС, однородное по точности пространственное геодезическое построение, состоящее из системы пунктов, удаленных один от другого на 150 - 300 км.

На пунктах ВГС выполняются определения нормальных высот и абсолютных значений ускорений силы тяжести. Для связи существующей сети с вновь создаваемыми геодезическими построениями определяется взаимное положение пунктов ФАГС и ВГС с ближними пунктами АГС со средней квадратической ошибкой, не превышающей 2 см по каждой координате. Для связи с главной высотной основой пункты ВГС привязываются к реперам нивелирной сети I - II классов или совмещаются с реперами соответствующих линий нивелирования.

Третий уровень в современной структуре ГГС занимает спутниковая геодезическая сеть 1-го класса, основная функция

которой состоит в обеспечении оптимальных условий для реализации точностных и оперативных возможностей спутниковой аппаратуры при переводе геодезического обеспечения территории России на спутниковые методы определения координат.

Средняя квадратическая ошибка определения положения пунктов СГС-1 относительно ближайших пунктов ВГС и ФАГС не должна превышать 1 - 2 см в районах с сейсмической активностью 7 и более баллов и 2 - 3 см в остальных регионах страны.

Нормальные высоты должны определяться на всех пунктах СГС-1, либо из геометрического нивелирования с точностью, соответствующей требованиям к нивелирным сетям II...III классов, либо из спутникового нивелирования как разности геодезических высот, определяемых относительными методами космической геодезии, и высот квазигеоида.

Геодезические сети специального назначения создаются в тех случаях, когда дальнейшее сгущение пунктов ГГС экономически нецелесообразно или когда требуется особо высокая точность геодезической сети.

9. Государственная нивелирная сеть Российской Федерации

9.1 Общие положения

Нивелирная сеть представляет собой совокупность закрепленных на местности точек, высоты которых определены путем геометрического нивелирования.

Основой для определения высот пунктов в России служит *государственная нивелирная сеть* I, II, III и IV классов.

На территории России вычисление высот производится в нормальной системе от нуля Кронштадтского футштока. Эта система называется Балтийской. За нуль футштока принята горизонтальная черта на медной пластинке футштока.

Главной высотной основой страны является государственная нивелирная сеть I и II классов, назначением которой является распространение единой системы высот на территорию всей страны. Нивелирные сети I и II классов используются также для решения таких научных задач, как изучение фигуры физической поверхности Земли и ее гравитационного поля, определение разностей высот уровней морей и океанов, изучение вертикальных движений земной коры и др.

Нивелирная сеть строится по принципу перехода от общего к частному. Государственная нивелирная сеть I класса имеет наивысшую точность и служит исходной для сетей следующих классов. Нивелирная сеть II класса опирается на пункты I класса, является ее сгущением. Невязки в сетях I и II классов не должны превышать соответственно $3\text{мм} \times \sqrt{L}$ и $5\text{мм} \times \sqrt{L}$, где L – длина нивелирного хода, выраженная в километрах.

Нивелирные сети III и IV классов опираются на сеть I и II классов и служат основой для создания высотного обоснования топографических съемок местности и решения различных инженерных задач. Невязки в таких сетях не должны превышать соответственно $10\text{мм} \times \sqrt{L}$ и $20\text{мм} \times \sqrt{L}$.

Линии нивелирования I и II классов прокладываются преимущественно вдоль шоссейных и железных дорог, а при их отсутствии, особенно в северных районах – по берегам рек, тропам и зимникам. В линии нивелирования включают или привязывают пункты спутниковой геодезической сети, ФАГС, ВГС и СГС-1.

Нивелирование I и II классов создается в виде полигонов, а нивелирные сети III и IV классов прокладываются внутри полигонов высшего класса, как отдельными линиями, так и в виде системы линий, при этом сети и линии должны опираться не менее чем на 2 репера высшего класса.

Линии государственной нивелирной сети закрепляются на местности реперами не реже чем через 5 км (по трассе).

На линиях нивелирования закладывают реперы следующих типов: вековые, фундаментальные, грунтовые, скальные и временные. Координаты вековых и фундаментальных реперов определяют геодезическими приборами с ошибкой не более 1 м, грунтовых реперов и марок с ошибкой не более 10 м.

9.2 Планирование нивелирных работ

Перед составлением проекта собирают и анализируют все материалы ранее выполненных нивелирных работ. Особое внимание при анализе материалов ранее выполненных нивелирных работ следует обращать внимание на величины вертикальных деформаций земной поверхности в зонах узлов связи нивелирной сети: планируемого места связи проектируемых и существующих линий нивелирования.

При обнаружении значительных деформаций земной поверхности узлового пункта (репера), влияющих на величину замыкания полигона с учетом новых измерений, в техническом проекте должны быть предусмотрены работы по формированию нового узлового пункта и связь его с существующими линиями нивелирования.

Обследование и рекогносцировка производятся до составления проекта на восстановление и закладку реперов и нивелирование I и II классов, что даст достоверные сведения об объемах проектируемых работ и повысит качество проектов.

В техническом проекте устанавливают объем работ, их сметную стоимость, намечают технологию выполнения нивелирования и материально-техническую обеспеченность работ.

Проектирование линий нивелирования всех классов выполняют на картах масштабов 1:100 000 – 1:200 000.

Рекогносцировка и обследование обязательны на линиях нивелирования всех классов. Разрешается совмещать эти работы с закладкой реперов. При рекогносцировке ищут опти-

мальные варианты линий и узлов связи, намечают типы реперов и места для закладки, а также собирают необходимые сведения для организации и выполнения последующих работ.

В целях выбора наиболее обоснованных вариантов линий и наилучших мест для закладки реперов к рекогносцировке линий государственного нивелирования I класса привлекаются геологические организации, а в особо сложных условиях - геологов или геоморфологов - географов.

Пункты государственной нивелирной сети надежно закрепляют на местности с помощью знаков – *реперов*. В зависимости от условий местности и характера грунта реперы бывают грунтовые, скальные и стенные.

Грунтовый репер состоит из железобетонного пилона сечением 16x16 см с маркой вверху и бетонной плитой (якорем) внизу. Марка должна находиться на 0,5 м ниже поверхности земли, а якорь - не менее чем на 0,5 м ниже глубины сезонного промерзания грунта.

Скальный репер представляет собой вцементированную в скалу чугунную марку.

Стенной репер – представляет собой вцементированную в стену чугунную марку с выступом для установки на него нивелирной рейки или отверстием для ее подвешивания. Стенные реперы закладывают в цокольной части фундаментальных зданий или сооружений (опора моста, здание пассажирского вокзала, водонапорная башня).

На застроенной территории реперы закладывают не реже, чем через 5 км, а на незастроенной – не реже, чем через 7 км.

9.3 Особые случаи нивелирования I и II класса

Особыми случаями нивелирования I и II класса является:

- нивелирование через реку;
- нивелирование оврагов;
- нивелирование через препятствие;
- нивелирование в северных и горных районах.

Рекогносцировку линий нивелирования I и II классов в районах севера и северо-востока Российской Федерации и закладку реперов выполняют отдельно за год до нивелирования. Места для закладки реперов выбирают с учетом глубины протаивания грунтов. При рекогносцировке определяют наиболее выгодные

периоды для выполнения работ на каждом участке линии, способствуя тем самым уменьшению влияния систематических ошибок. Для проложения линий нивелирования I и II классов в районах севера и северо-востока России, кроме грунтовых дорог, используют берега рек, тропы и зимники. Если таких трасс на местности нет, то линии нивелирования прокладывают по направлениям с наиболее благоприятными грунтовыми условиями и с наименее пересеченным рельефом. Во всех случаях при проектировании и последующей рекогносцировке изыскивают варианты с наименьшим числом водных препятствий и заболоченных участков.

Линии нивелирования I и II классов в горных районах прокладывают по трассам с наименьшими перепадами высот. Лучшими трассами являются шоссейные дороги. В горных долинах шириной более 2 км нивелирование следует начинать только после того, как солнце осветит 40-50% склонов, и прекратятся медленные плавающие колебания изображений рейки; заканчивают наблюдение примерно за 30 мин до захода солнца, прежде чем эти колебания вновь начнутся.

Перед началом нивелирования I и II классов и III класса в горных районах устанавливают в соответствии с требованиями, достаточна ли точность существующей гравиметрической съемки для вычисления поправок за переход к системе нормальных высот. Если имеющаяся гравиметрическая съемка недостаточна, то выполняют измерения силы тяжести на местности. Ускорения силы тяжести измеряют на всех реперах; точках перегиба рельефа, где наклон линии изменяется более чем на 2° ; в точках поворота линии более чем на 30° , а также в дополнительных точках при уклонах линии нивелирования I класса более 0,02 и II класса более 0,04. Частота гравиметрических пунктов зависит от уклона линии и должна отвечать определенным требованиям

9.4 Технические средства выполнения нивелирных работ

Приборы и вспомогательное оборудование для нивелирных работ:

- нивелиры;
- нивелирные рейки;

- полевой электронный журнал (регистратор информации) для регистрации отсчетов по рейкам и обработки результатов измерений на станции и по нивелирному ходу;

- штатив нивелира по ГОСТ 11158 для установки прибора в рабочее положение;

- рейкодержатели (или подпорки) для надежного удержания рейки в вертикальном положении по уровню;

- термометр - пращ для измерения температуры воздуха в процессе измерений (в нивелировании I - II классов - на каждой нечетной станции по ходу, в нивелировании III и IV классов - в начале и конце работы);

- нивелирные костыли со сферической головкой для установки на них рейки;

- нивелирные башмаки, используемые наряду с костылями, в нивелировании III и IV классов;

- стальной трос или рулетка длиной 50 (100) м для измерения расстояний от нивелира до рейки;

- топографический зонт для защиты прибора от солнечной радиации и одностороннего нагрева, а так же от атмосферных осадков.

К нивелирным работам допускаются приборы, прошедшие испытания для целей утверждения типа и на которые выданы свидетельства о поверке установленной формы

10. Основы теории потенциала

10.1 Сила притяжения и ее потенциал

На любую материальную точку на поверхности Земли действуют, как минимум, две силы : ньютоновская сила притяжения F и центробежная P , вызванная вращением Земли вокруг своей оси. Равнодействующая этих сил называется силой тяжести и обозначается буквой g . Распределение g на поверхности Земли изучает гравиметрия. Сила тяжести выражается в виде векторной суммы:

$$\vec{g} = \vec{F} + \vec{P}.$$

Основную часть силы тяжести составляет сила притяжения F . Даже на экваторе, где центробежная сила достигает максимума, отношение силы тяжести к центробежной составляет 1/288, т.е. величину порядка сжатия Земли. Поэтому при изучении гравитационного поля Земли основные усилия направлены на изучение поля притяжения.

В основу теории потенциала положен закон всемирного тяготения, согласно которому сила притяжения двух материальных точек прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Для получения значения силы данное отношение умножается на коэффициент пропорциональности, который называется гравитационной постоянной, не зависящей ни от физических и химических свойств точек, ни от значения и направления скорости движения. Значение постоянной определяется выбранной системой единиц длины, массы и времени.

Сила притяжения представляет собой вектор, направленный от притягиваемой точки к притягивающей. Этот вектор определяется как величиной, так и направлением в пространстве.

Применительно к точкам земной поверхности формула для вычисления силы тяжести может быть упрощена, так как масса притягиваемой массы ничтожно мала и принимается без потери точности за единицу.

Если взять функцию вида:

$$V = f \frac{m}{r}$$

и найти ее частные производные по координатам притягиваемой точки, то они окажутся равны составляющим силы тяжести по соответствующим осям координат. Такая функция называется потенциальной или потенциалом силы тяжести. Это геометрический смысл потенциала, который можно обобщить таким образом: производная от потенциала притяжения по любому направлению равна составляющей силы тяжести по этому направлению.

Потенциал силы притяжения некоторой точки пространства есть работа, которую совершает сила притяжения, обусловленная притягивающим телом, при перемещении под ее действием единичной массы из бесконечности в данную точку. Данное представление выражает физический смысл потенциала.

При перемещении точки в пространстве приращение потенциала равно произведению силы тяжести F на пройденное расстояние s и косинус угла между направлениями F и s .

Отсюда можно рассмотреть два предельных случая.

1. Если точка перемещается по направлению s , перпендикулярному к направлению силы тяжести F , то $\cos(F, s) = 0$, тогда

$$dV = 0,$$

работа силы тяжести равна нулю. Интегрируя данное выражение, найдем потенциал, который будет равен постоянной величине

$$V = c = \text{const.}$$

Это выражение есть уравнение уровня поверхности, обладающей тем свойством, что в любой ее точке сила притяжения направлена по нормали к этой поверхности,

2. Если точка перемещается по направлению s , совпадающему с направлением силы тяжести F , то $\cos(F, s) = 1$, тогда

$$dV = F ds.$$

Величина ds в этом случае есть расстояние между двумя уровнями поверхностями, потенциалы которых отличаются на величину dV .

Знак приращения потенциала зависит от направления перемещения точки, Положительный знак будет при перемещении точки по нормали к центру тела, отрицательный – при перемещении точки от центра тела.

10.2 Потенциал силы тяжести

На каждую точку помимо силы притяжения действует и центробежная сила, вызванная вращением Земли вокруг своей

оси. Равнодействующая этих двух сил, действующая на единицу точечной массы, называется силой тяжести. Сила притяжения и ее потенциал рассмотрены в предыдущем параграфе. Для определения потенциала силы тяжести найдем центробежную силу и ее потенциал.

Центробежная сила, вызываемая вращением Земли вокруг своей оси, действует на каждую точку Земли и направлена перпендикулярно оси вращения.

Центробежная сила P , действующая на единичную массу, численно равна центробежному ускорению и вычисляется как отношение линейной скорости вращения v к расстоянию p от точки до оси вращения:

$$P = v / p.$$

Если ввести прямоугольную систему координат x, y, z с началом в центре Земли, то потенциал центробежной силы u выразится формулой:

$$u = (x + y),$$

а потенциал силы тяжести будет равен сумме двух потенциалов:

$$W = V + u.$$

Потенциал силы тяжести W максимален в центре Земли и убывает по мере удаления от центра. Частные производные функции W по осям координат x, y, z равны составляющим силы тяжести g по этим осям. В общем можно сказать, что производная силы тяжести по любому направлению равна проекции силы на это направление:

$$dW = g \cos(s, g) ds$$

3. Уровенные поверхности потенциала силы тяжести и отвесные линии

Приращение потенциала есть работа материальной точки при ее перемещении в поле силы тяготения. Если точка перемещается в направлении s , перпендикулярном направлению g действия силы тяжести, то $\cos(s, g) = 0$. Тогда и приращение потенциала dW тоже равно нулю. Интегрируя выражение для приращения потенциала силы тяжести, получим:

$$W(x, y, z) = c = \text{const.}$$

Это уравнение некоторой поверхности потенциала силы тяжести, нормали к которой совпадают с направлением силы тяжести. Такая поверхность получила название уровенной. Работа, совершаемая по перемещению точечной массы по этой поверхности, равна нулю. Следовательно, потенциал на уровенной по-

верхности всюду сохраняет постоянное значение. На материальную точку, находящуюся на этой поверхности, не действуют тангенциальные составляющие силы (их направление совпадает с касательной к поверхности в этой точке, и поэтому они равны нулю), следовательно, точка находится в равновесии.

Задавая в уравнении потенциала W различные значения постоянной c , получим семейство уровенных поверхностей, которые не пересекают и не касаются друг друга. В противном случае потенциал не определялся бы однозначно.

Рассмотрим другой, важнейший случай, из которого исходит теория высот. Пусть движение массы совершается в направлении действующей силы (вдоль вектора g). Тогда угол $(s, g) = 0$, $\cos(s, g) = 1$, а:

$$dW = g ds.$$

В этом случае потенциал получает максимальное приращение. В приведенном выражении ds – перемещение точки перпендикулярно к уровенной поверхности; dW – приращение потенциала при переходе от одной уровенной поверхности к другой, бесконечно близкой. Отсюда не составляет труда определить расстояние между двумя уровенными поверхностями, которое в геодезии называют высотой и обозначают буквой h :

$$dW = g dh,$$

откуда

$$dh = dW / g.$$

Полученное выражение соответствует перемещению точки по нормали к центру тела. Очевидно, что расстояние между уровенными поверхностями обратно пропорционально силе тяжести. Поскольку значение силы тяжести в различных точках уровенной поверхности различно, то и расстояние между уровенными поверхностями тоже разное. Таким образом, уровенные поверхности располагаются чаще, чем больше сила тяжести g . Например, на полюсах Земли уровенные поверхности располагаются ближе друг к другу, чем на экваторе.

Поскольку потенциал постоянен на уровенной поверхности, то при переходе с одной поверхности на другую приращение потенциала будет величиной постоянной и не зависящей от пути перемещения точки.

Сечения уровенных поверхностей представляют собой кривые, не параллельные между собой. Линии, пересекающие уровенные поверхности ортогонально, называются силовыми. Иными

словами, пространственная кривая, в каждой точке которой ее касательная совпадает с направлением действия силы тяжести, называется силовой линией.

Прямая, совпадающая с направлением действия силы тяжести в данной точке, называется отвесной линией. Отвесная линия является нормалью к уровенной поверхности и играет важнейшую роль в геодезии, так как все измерения на физической поверхности Земли связаны именно с ней. При угловых измерениях теодолитом или тахеометром прибор горизонтируют по уровню, чтобы его вертикальная ось была совмещена с отвесной линией в данной точке. При геометрическом нивелировании с помощью уровня визирная ось зрительной трубы устанавливается перпендикулярно отвесной линии.

Направление отвесной линии фиксируется астрономическими координатами широтой и долготой, которые определяются, в частности, из астрономических наблюдений. В принципе, направление отвесной линии позволяет фиксировать одну из осей системы координат и приводить, тем самым, все измерения на поверхности Земли в единую систему отсчета. Направление отвесной линии безусловно необходимо для редуцирования измерений с поверхности Земли на математическую поверхность (плоскость, сфера, эллипсоид).

11. Нормальное гравитационное поле Земли

11.1 Нормальный и возмущающий потенциал

Изучение фигуры Земли неразрывно связано с исследованием гравитационного поля Земли, которое характеризуется потенциалом силы тяжести. Однако непосредственное вычисление W как суммы потенциалов притяжения V и центробежной силы u невозможно, так как определение первого предполагает знание плотности распределения масс во всех точках Земли. Естественно, такими данными наука не располагает, поэтому применяется метод приближений.

Сначала из потенциала W выделяется основная часть, которая вычисляется относительно просто и точно. Она получила название нормального потенциала и обозначается буквой U . Таким образом, нормальный потенциал соответствует теоретическому значению потенциала силы тяжести Земли, фигура которой представляет математическую поверхность (эллипсоид), а распределение масс внутри данной фигуры однородно. Стремление к представлению реальной фигуры Земли более точной математической моделью, а, следовательно, уменьшить расхождения по отдельным параметрам между Землей и моделью, продиктовано как требованиями естественных наук, так и собственно геодезией. Чем точнее модель, тем меньше редукции, тем точнее определение координат на поверхности Земли.

Одним из представлений реальной Земли является геоид, уровенная поверхность, совпадающая с поверхностью океанов и морей. В настоящее время отклонения фигура геоида и общеземного эллипсоида (модели Земли) составляет порядка 100 м.

Таким образом, определение потенциала силы тяжести сводится к вычислению его отклонений от нормального потенциала, теоретические основы установления которого рассмотрим ниже.

Возможность определения нормального потенциала возникает из теоремы Стокса, если известны общая масса планеты, ее угловая скорость вращения и уровенная поверхность силы тяжести, внутри которой заключены все притягивающие массы, то могут быть определены потенциал и его первые производные (составляющие силы тяжести) во внешнем пространстве независимо от распределения масс внутри поверхности, при которых форма поверхности и угловая скорость остаются неизменными.

Решение этой задачи составляет так называемую проблему Стокса, которая решена в настоящее время для наиболее простых фигур: эллипсоида вращения и трехосного эллипсоида, что практически удовлетворяет потребности теории фигуры Земли и других планет солнечной системы. Теорема дает принципиальную возможность определения W и g независимо от плотности, но не дает ответа для данной конкретной уровенной поверхности.

Условия для определения потенциальной функции V вытекают из общих свойств потенциала силы тяжести:

оператор Лапласа (сумма вторых частных производных V по осям координат) равна нулю;

функция V должна быть непрерывной и конечной и иметь непрерывные и конечные первые производные;

на большом расстоянии r от точки тела $\lim_{r \rightarrow \infty} r V = fM$.

Введение нормального потенциала позволяет определить потенциал силы тяжести как суммы нормального и, так называемого, возмущающего T потенциалов. Отсюда разность между потенциалом силы тяжести Земли и его нормальным значением называется возмущающим потенциалом:

$$T = W - U.$$

Возмущающий потенциал обладает всеми свойствами потенциала тяготения. Он определяет степень отступления точек физической поверхности от выбранной модели. Примем за модель Земли поверхность уровенного эллипсоида, на котором потенциал силы тяжести U имеет одно и то же значение, а значение силы тяжести на поверхности принимает нормальное значение γ . Потенциал геоида примем равным $U + T$, тогда высота между этими поверхностями определится по формуле:

$$N = \frac{T}{\gamma}.$$

Таким образом, для получения высоты геоида над уровенным эллипсоидом в точках поверхности геоида необходимо знать возмущающий потенциал.

11.2 Нормальная Земля.

Фундаментальные геодезические постоянные

Фигура Земли формируется под воздействием гравитационного поля. Сложность гравитационного поля обусловлена нерав-

номерностью физической поверхности Земли и ее внутреннего строения. При решении многих задач геодезии, как указывалось ранее, представляется удобным рассматривать не действительное гравитационное поле Земли, а его отклонение от некоего простого, математически описываемого поля, создаваемого Нормальной Землей. По этой причине гравитационное поле представляют в виде двух составных частей: основного или нормального, и аномалий, представляющих из себя отклонения реального поля от нормального. Нормальное поле изменяется лишь по широте в связи с изменением центробежной силы в значительных пределах, но по строго определенному закону.

Таким образом, нормальное гравитационное поле представляет собой поле силы тяжести, которое имела бы Земля с формой эллипсоида вращения с однородным, равномерным распределением масс. В зависимости от принятого эллипсоида будет изменяться и нормальное гравитационное поле.

За эллипсоид принимается как общеземной, так и любой референц-эллипсоид. Эллипсоиды отличаются друг от друга размерами, формой и способом ориентирования в теле Земли.

Общий земной эллипсоид ориентируется таким образом, что его центр совмещается с центром масс Земли.

Референц-эллипсоид ориентируется путем установления исходных геодезических дат, поэтому его центр не совпадает с центром масс Земли.

Исходя из вышесказанного делаем вывод, что центробежные силы и потенциалы Земли и общего земного эллипсоида будут в общем совпадать, чего нельзя сказать о центробежном потенциале референц-эллипсоида.

Нормальному гравитационному полю соответствует нормальный потенциал U , достаточно точно представляющий потенциал силы тяжести Земли W .

Определение нормального потенциала Земли основано на решении проблемы Стокса для эллипсоида вращения, параметры которого должны подбираться таким образом, чтобы квадраты отклонений U от W были минимальными и ими можно было пренебречь. Распределение масс внутри эллипсоида должно быть таким, чтобы направление нормальной силы тяжести в каждой точке поверхности эллипсоида совпадало с направлением нормали к этой поверхности.

Формулы для вычисления нормального значения силы тяжести были выведены французским ученым А.К.Клеро. Значения коэффициентов в формуле Клеро вычисляются из обработки обширных гравиметрических определений. Значение нормальной силы тяжести для уровенного эллипсоида, вычисленное по формуле с числовыми коэффициентами, получило название теоретического значения силы тяжести, а сама формула называется формулой нормального распределения силы тяжести.

В международной геодезической практике используется несколько формул нормального распределения силы тяжести. В нашей стране применяется формула немецкого геодезиста Гельмерта, которая имеет вид:

$$\gamma_0 = 978,030(1 + 0,005302 \sin^2 B - 0,000007 \sin^2 2B).$$

Эту формулу Гельмерт получил из обработки измерений силы тяжести на 1603 пунктах, распределенных по 9 зонам.

Формулы нормального распределения силы тяжести периодически уточняются с получением новых измерений, а переход государств на новые формулы сопряжен с перевычислением большого числа пунктов, переизданием каталогов и карт. Поэтому при необходимости проще и дешевле вводить поправки в конечные результаты.

Значимость нормального гравитационного поля необычайно велика, поэтому параметры, характеризующие это поле называются фундаментальными геодезическими постоянными. В качестве фундаментальных в настоящее время приняты следующие величины: a – большая полуось уровенного эллипсоида; fM – геоцентрическая гравитационная постоянная; J_2 – зональный коэффициент; ω – угловая скорость вращения Земли. Значения fM , a , J_2 систематически уточняются по спутниковым и наземным наблюдениям.

12. Аномалии силы тяжести.

Астрономо-гравиметрическое нивелирование

12.1 Аномалии и редукции силы тяжести

Поскольку нормальное значение силы тяжести γ_0 вычисляется на поверхности эллипсоида, а реальное значение силы тяжести g на физической поверхности Земли, то эти значения будут отличаться друг от друга. Расхождения γ_0 и g во много раз превосходят ошибки гравиметрических определений. Разность между измеренным значением силы тяжести на Земле и ее нормальным значением в данной точке называется аномалией силы тяжести. Вычисляемой по формуле:

$$\Delta g = g - \gamma_0.$$

Аномальное поле в отличие от нормального изменяется случайным образом, зато имеет незначительные пределы изменения на поверхности Земли. Так на большей ее части аномалии силы тяжести составляют десятки миллигал. Максимальное значение составляет +660 мГал на острове Гавайи, а минимальное в желобе Пуэрто-Рико, Атлантический океан – минус 380 мГал. Положительные аномалии соответствуют избытку притягивающих масс в данном районе, а отрицательные – недостатку.

Аномалии силы тяжести служат исходными данными для вычисления возмущающего потенциала Земли.

Принципиально, что значение силы тяжести g относится к конкретной точке поверхности Земли, а нормальное значение γ_0 - к точке уровенного эллипсоида.

В связи с этим возникает задача приведения этих значений к какой – либо одной точке, которая в геодезии носит название редукции. Исходя из теории М. С. Молоденского, требуется привести значение силы тяжести в нормальное поле.

Если отложить вверх от уровенного эллипсоида значение нормальной высоты в направлении точки M , находящейся на поверхности Земли, то получим точку N , близкую к M . Вычислим нормальное значение силы тяжести для точки N , разложив нормальное значение силы тяжести в ряд Тейлора по аргументу H^γ и ограничиваясь первым членом разложения получим:

$$\gamma_N = \gamma_0 + \frac{\partial \gamma}{\partial n} H^\gamma.$$

Частная производная $\frac{\partial \gamma}{\partial n}$ называется вертикальным градиентом нормальной силы тяжести. Разность между γ_N и γ_0 называют редукцией за высоту или редукцией силы тяжести в свободном воздухе.

Значение вертикального градиента силы тяжести для Земли составляет - 0,3086 мГал/м.

Аномалию силы тяжести, вычисленную с редукцией в свободном воздухе, называют аномалией силы тяжести в свободном воздухе, которая играет очень важную роль в изучении формы Земли. Рабочая формула для вычисления такой аномалии имеет вид:

$$\Delta g_{св.в} = g_m - \gamma_0 + 0,3086 H^\gamma.$$

Аномалии в свободном воздухе в большей степени зависят от рельефа местности и в горной местности изменяются интенсивно и имеют большие величины. Поэтому в горной местности линейное интерполирование аномалий дает неудовлетворительные результаты.

Если из аномалий в свободном воздухе исключить притяжение масс, расположенных между уровнем моря и физической поверхностью Земли, то остаточные аномалии будут изменяться плавно, а интерполирование приведет к положительным результатам. Приблизительно влияние внешних масс можно учесть поправкой за притяжение промежуточного слоя.

Промежуточным слоем называют массы, заключенные между уровнем моря (поверхностью квазигеоида) и уровенной поверхностью, проходящей через точку наблюдения. Поправка за промежуточный слой зависит от плотности масс и значения нормальной высоты:

$$\Delta g = -2fDH^\gamma.$$

Подставив численные значения f и получим

$$\Delta g = -0,041DH^\gamma.$$

Суммарная поправка за свободный воздух и промежуточный слой называется редукцией Буге

$$\Delta g_{\sigma} = 0,3086H^{\gamma} - 0,041DH^{\gamma}.$$

Разность между измеренным значением силы тяжести и нормальным с учетом редукции Буге называется аномалией Буге:

$$\Delta g_B = g - \gamma_0 + \Delta g_{\sigma}.$$

Для сглаживания окружающей местности под горизонтальную плоскость, проходящую через данную точку, вводится поправка за рельеф, под которой понимается поправка в измеренное значение силы тяжести, возникающая вследствие отступления физической поверхности Земли в окрестности наблюдаемой точки от ее уровенной поверхности. Поправка за рельеф всегда положительна и учитывается в всхолмленной и особенно горной местности, где достигает величин сотен миллигал. Величина поправки Δg_p зависит от высоты точки наблюдения и плотности окружающих точку масс.

Суммарная поправка за свободный воздух и влияние рельефа называется редукцией Фая:

$$\Delta g_p = 0,3086H^{\gamma} + \Delta g_p.$$

Аномалия, полученная с учетом редукции Фая, называется аномалией Фая и имеет вид:

$$(g - \gamma)_F = g + 0,3086H^{\gamma} + \Delta g_p - \gamma_0.$$

По аномалиям силы тяжести составляются гравиметрические карты в редукциях Буге, Фая и свободном воздухе. Они используются как для изучения фигуры Земли, так и решения прикладных задач, например, поиска полезных ископаемых.

12.2 Уклонения отвесных линий

Вследствие отличия реального гравиметрического поля Земли от нормального, обусловленного сложностью фигуры и внутреннего строения, направление вектора силы тяжести g (силы тяжести) не совпадает с вектором

нормальной силы тяжести γ (нормали к эллипсоиду).

Угол между отвесной линией и нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке называется уклонением отвесной линии. Уклонения в зависимости от метода их определения имеют собственные названия. Так угол между отвесной линией g и нор-

малью γ к поверхности общего земного эллипсоида в данной точке называется гравиметрическим уклонением отвесной линии.

Угол между отвесной линией g и нормалью n к поверхности референц-эллипсоида в данной точке называется астрономо-гравиметрическим уклонением отвеса. Так как поверхности общеземного эллипсоида и референц-эллипсоида не совпадают, то не совпадают и нормали γ и n , а значит гравиметрические и астрономо-гравиметрические уклонения отвеса в конкретной точке будут различными.

Гравиметрические уклонения зависят только от распределения масс Земли, а астрономо-гравиметрические еще и от принятых размеров референц-эллипсоида и его ориентировки в теле Земли.

Направление отвесной линии на земной поверхности определяется астрономическими координатами (широтой φ и долготой λ). Направление нормали к поверхности референц-эллипсоида определяется геодезическими координатами B и L .

Уклонения отвесных линий непосредственно связано с решением редуцированных задач. Эта необходимость вызвана тем, что измерения, выполненные на поверхности Земли, связаны с отвесной линией, а математическая обработка измерений выполняется на поверхности референц-эллипсоида, нормаль к поверхности которого является основной координатной линией

12.3 Астрономо-гравиметрическое нивелирование

Астрономо-гравиметрическим нивелированием называют метод определения высоты квазигеоида путем совместного использования астрономо-геодезических и гравиметрических данных. Данный метод был разработан М. С. Молоденским, что позволило в условиях огромного масштаба нашего государства достаточно точно определять фигуру Земли при относительно невысоких затратах средств.

Сущность астрономо-гравиметрического нивелирования состоит в использовании гравиметрических уклонений отвеса для интерполяции астрономо-геодезических уклонений. Гравиметрические уклонения отвеса подсчитываются по данным гравиметрической съемки (гравиметрическим картам) довольно быстро, повсеместно и точно. Затраты на их определение, в отличие от астрономо-геодезических, относительно невелики. Астрономо-

геодезические уклоны определяются из высокоточных астрономических наблюдений, продолжительных во времени (около месяца) и, естественно, затратных. В районах работ по астрономо-гравиметрическому нивелированию определяют редкую сеть астрономо-геодезических пунктов, на которых производят и астрономические и гравиметрические наблюдения, а затем вычисляют оба вида уклонов. Такие пункты считаются исходными относительно большего числа определяемых пунктов, на которых определяют лишь гравиметрические уклоны. На исходных пунктах вычисляют разности гравиметрических и уклонов, которые затем линейной интерполяцией пересчитывают на определяемые пункты, где и получают астрономо-геодезические уклоны. В равнинной местности для достижения необходимых точностей расстояния между исходными пунктами могут достигать порядка 100 км. При работах в горных районах исходная основа должна быть определена значительно чаще и точнее, что определяется программой наблюдений.

13. Основы теории высот

13.1 Общие соображения

Роль высот в геодезической практике огромна. С их помощью отображается рельеф на картах и планах, строятся трехмерные модели местности. Высоты необходимы при редуцировании измеренных величин на поверхность относимости, обеспечивая требуемую точность геодезических построений.

Высота точки земной поверхности H – одна из координат, определяющих физическую поверхность Земли относительно отсчетной поверхности, которая может быть уровенным эллипсоидом, референц-эллипсоидом, геоидом. В зависимости от перечисленных типов отсчетной поверхности будем иметь и различные высоты: геодезические; нормальные и ортометрические.

13.2 Понятие о геоиде и квазигеоиде

При рассмотрении потенциала силы тяжести была приведена формула:

$$W(x, y, z) = c = \text{const.}$$

Присваивая различные значения c , получим ряд уровенных поверхностей, среди которых будет и основная уровенная поверхность, наилучшим образом представляющая Землю в целом.



Рис. 13.1. Поверхность геоида

Так как точки поверхности Земли находятся на разных высотах (уровнях), то результаты измерений, проводимые в них, будут относиться к разным уровенным поверхностям и замкнутых фигур в геодезических сетях не будет. В связи с этим возникает проблема редуцирования измерений на общую уровенную по-

верхность. Так как 3/4 Земли занимают океаны и моря, то целесообразно за такую поверхность принять невозмущённую поверхность океанов и морей, продолженную под континентами и островами так, чтобы везде быть перпендикулярной вектору силы тяжести. Ее называют поверхностью геоида (рис. 13.1). Именно от неё и желательно отсчитывать высоты точек.

Из-за неравномерности плотности земной коры, поверхность геоида имеет неправильную форму и не может быть описана в виде конечных формул, как, например, поверхность эллипсоида. Вследствие этого возникает задача изучения фигуры геоида, как описания высот возможно большего количества его точек над поверхностью эллипсоида (рис.13.2).

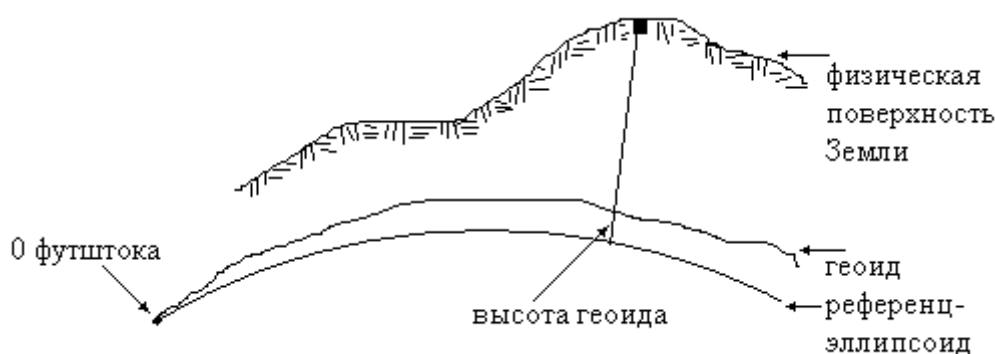


Рис 13.2. Высота геоида



Рис. 13.3. Уровенные поверхности

Исследования показали, что линия силы тяжести в любой точке не является прямой, а искривлена. Поэтому и уровенные (эквипотенциальные) поверхности, располагающиеся на разных высотах, не параллельны друг другу (рис. 13.3). Уровенная по-

верхность в точке стояния в общем случае не параллельна поверхности геоида. Исследование этой не параллельности является одной из задач высшей геодезии.

Российским учёным-геодезистом М. С. Молоденским было предложено отсчитывать высоту от поверхности, которая не является уровенной, но очень близка к поверхности геоида. Речь идет о поверхности, параллельной уровенным поверхностям на поверхности Земли (рис. 13.4). При этом на морях и океанах она совпадает с поверхностью геоида. Такая поверхность была названа поверхностью квазигеоида.

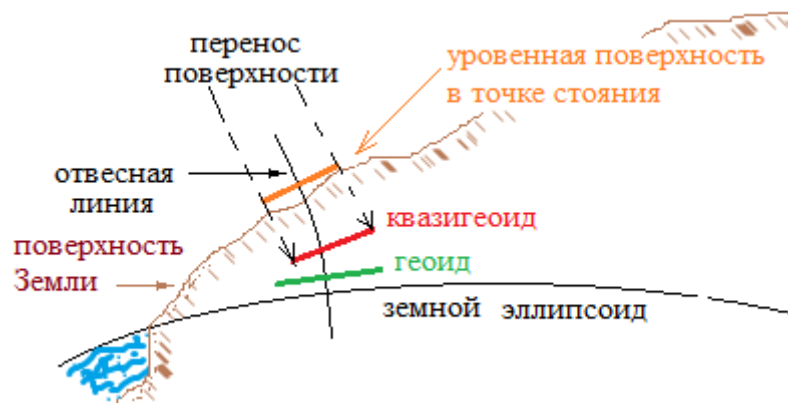


Рис. 13.4. Фрагмент квазигеоида

13.3 Ортометрические, нормальные, и динамические высоты

Ортометрической высотой называется высота над поверхностью геоида. Ортометрическую высоту можно получить через разность потенциалов двух точек, одна из которых находится на физической поверхности Земли, а другая на геоиде. Ортометрическая высота определяется однозначно, поскольку разность потенциалов точек не зависит от пути нивелирного хода, связывающего эти точки. Вычисление ортометрической высоты крайне затруднено, так как для ее определения требуется знание среднего значения силы тяжести g_m по линии искомой высоты. Для ее точного вычисления необходимо знать распределение и плотность масс как внутри геоида, так и в пространстве между геоидом и точкой поверхности Земли, высота которой подлежит определению. В практике ортометрические высоты не применяются и по причине того, что высоты точек, находящихся на одной уровенной поверхности, будут разными.

От этого недостатка свободны нормальные высоты, введенные в практику М.С. Молоденским.

Высоту от поверхности квазигеоида до точки (рис. 13.5) называют *нормальной высотой* H_γ , а высоту расположения квазигеоида над эллипсоидом - *аномалией высоты* ζ . Нормальная высота и аномалия высоты в сумме дают геодезическую высоту точки H , то есть:

$$H = H_\gamma + \zeta .$$

Определение аномалий высоты, составление карт высот квазигеоида и математических моделей этих высот входят в число задач высшей геодезии.

Высоты квазигеоида могут быть как положительными, так и отрицательными, следовательно, поверхность его может быть выше и ниже относительно уровня эллипсоида. С точки зрения теории потенциала нормальной высотой H_γ называется величина, численно равная отношению геопотенциальной величины $\int gdh$ к среднему значению нормальной силы тяжести γ_m Земли по отрезку, отложенному от поверхности земного эллипсоида до искомой точки.

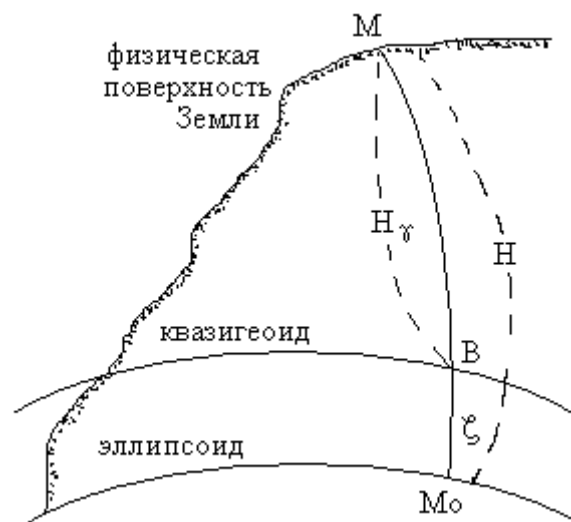


Рис. 13.5. Нормальная высота и аномалия высоты

Нормальная высота определяется однозначно независимо от пути нивелирования. Точки, расположенные на одной уровенной поверхности, в общем случае будут иметь различные высоты, так как геопотенциал $\int gdh$ (интегральная сумма произведений значений силы тяжести на приращение высоты при проложении нивелирного хода) – величина постоянная, а γ_m изменяется с ши-

ротой. Нормальные высоты будут равны лишь в том случае, если точки одной и той же уровенной поверхности находятся на одной параллели.

Таким образом, ортометрические и нормальные высоты на одной и той же уровенной поверхности изменяются от точки к точке, но различно. Если ортометрические высоты изменяются хаотично в зависимости от значения g_m , то нормальные высоты изменяются закономерно в соответствии с изменением нормального значения силы тяжести γ_m в зависимости от широты.

Нормальная высота и аномалия высоты вычисляются точно без знания закона распределения масс в теле Земли. Ошибка их вычисления зависит только от ошибок непосредственных измерений. В этом главное преимущество нормальных высот перед ортометрическими.

Динамической высотой называется величина, численно равная отношению геопотенциальной величины к некоторому фиксированному значению силы тяжести Земли. В качестве такого фиксированного значения применяется значение силы тяжести для района работ. Основное достоинство динамических высот – неизменность для одной уровенной поверхности, обусловило широкое применение их в инженерной практике: гидротехническом строительстве, проектировании железных дорог, определении разностей уровня воды в водоемах.

14. Государственная гравиметрическая сеть Российской Федерации

14.1 Общие положения

Государственная гравиметрическая сеть России является основой для выполнения гравиметрических исследований, имеющих целью изучение гравитационного поля и фигуры Земли и их изменений во времени, а также для решения других научных и народнохозяйственных задач, включая метрологическое обеспечение гравиметрических съемок. Она служит для распространения на территорию страны единой гравиметрической системы.

Высокоточная государственная гравиметрическая сеть представляет собой совокупность закрепленных на местности и гравиметрически связанных между собой пунктов, на которых выполняют относительные или абсолютные измерения ускорения силы тяжести и осуществляют определение высот и координат этих пунктов. Она подразделяется на государственную фундаментальную гравиметрическую сеть (ГФГС) и государственную гравиметрическую сет 1 класса (ГГС-1).

ГФГС является высшим звеном гравиметрической сети России и служит для определения и уточнения гравиметрической системы страны, ее связи с мировой и зарубежными гравиметрическими системами, для метрологического обеспечения гравиметрических сетей низших классов и гравиметрических съемок России.

Высшим звеном всей структуры координатного обеспечения территории страны является фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС). На всех пунктах ФАГС определяют координаты, высота и абсолютное значение ускорения силы тяжести, так что пункты ФАГС будут одновременно являться пунктами ГФГС. Средняя плотность размещения пунктов ГФГС в этом случае составит 1 пункт на 0,5-1,0 млн. км. Кроме того, абсолютные определения ускорения силы тяжести выполняются на пунктах высокоточной геодезической сети (ВГС).

Основной научной задачей, решаемой с помощью ГФГС, является изучение изменений гравитационного поля во времени. С этой целью на фундаментальных пунктах (ФП), размещаемых в различных геолого-тектонических регионах, систематически выполняются абсолютные и относительные определения ускорения

силы тяжести с максимально возможной на данный момент точностью. Один из пунктов ГФГС, расположенный в Москве, на котором имеется продолжительный ряд повторных определений ускорения силы тяжести, является Главным гравиметрическим пунктом России (ГГП). В районе Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Хабаровска и Петропавловска-Камчатского создаются главные фундаментальные пункты ("кусты" пунктов из трех и более ФП с расстоянием между пунктами 1-50 км и связанные между собой относителевыми измерениями с погрешностью <math><10\text{ мкГал}</math>).

ГГС-1 предназначена для распространения с требуемой точностью принятой гравиметрической системы на всю территорию страны. Построение ГГС-1 выполняют поэтапно. На первом этапе определяют от пунктов ГФГС основные пункты 1 класса с плотностью один пункт на 50-100 тыс. км. Результаты измерений на основных пунктах 1 класса и пунктах ГФГС уравнивают совместно и составляют каталог пунктов. Затем, учитывая перспективные требования практики, выполняют сгущение сети до плотности 1 пункт на 10-25 тыс. км путем вставок отдельных пунктов (именуемых далее пунктами 1 класса) в созданную на первом этапе сеть. Пункты размещаются с учетом удобства подъезда к ним наземным транспортом или подлета на вертолете. После завершения работ по сгущению ГГС-1 сеть уравнивают совместно с ГФГС как единое построение и составляют новый каталог, включающий все пункты ГФГС и ГГС-1. Пункты ГФГС и ГГС-1 служат исходными при развитии гравиметрических сетей низших классов.

14.2 Государственная фундаментальная гравиметрическая сеть

Для обеспечения максимально возможной точности измерений и долговременной сохранности фундаментальных пунктов их размещают в капитальных зданиях, рассчитанных на длительную эксплуатацию. По возможности ФП размещают в астрономических и геофизических обсерваториях или поблизости от них.

На каждом ФП выполняют абсолютные и относительные измерения ускорения силы тяжести, а также определения координат и высот пунктов. Гравиметрические определения по возможности выполняются одновременно с определением координат

и высот. Кроме того, на пунктах ГФГС определяют уровень грунтовых и подземных вод и влагонасыщенности почвы. Если фундаментальные пункты находятся в сейсмоактивных районах или в районах, где возможно проявление нестабильности гравитационного поля, число пунктов-спутников может быть увеличено до 20, а радиус их размещения - до 150 км.

При построении ГФГС предусматривают, чтобы каждый ФП был связан не менее чем с четырьмя ближайшими основными пунктами 1 класса, расположенными относительно него приблизительно на север, юг, восток и запад.

Повторные определения на пунктах ГФГС осуществляются по мере необходимости, но не реже чем один раз в 5-8 лет, либо после сильных землетрясений, извержений вулканов или других явлений в районе ФП, способных вызвать изменение ускорения силы тяжести.

Для гравиметрических определений на ФП применяют баллистические гравиметры, маятниковые комплексы типа "Агат", статические широкодиапазонные гравиметры типа Лакоста-Ромберг или равные им по точности, руководствуясь при этом инструкциями по эксплуатации этих приборов и указаниями данной инструкции.

Ср.кв. погрешность абсолютных определений ускорения силы тяжести баллистическим гравиметром на ФП не должна превышать 0,008 мГал. Ср.кв. погрешность определения приращения силы тяжести при помощи маятниковых комплексов и гравиметров Лакоста-Ромберг между ФП, а также между ФП и пунктами 1 класса, не должна превышать 0,030 мГал. При определении пунктов-спутников ср. кв. погрешность измеренных приращений силы тяжести не должна превышать 0,020 мГал.

Для редукции результатов к центру марки, а также для определения вертикальных градиентов ускорения силы тяжести, выполняют измерения соответствующих разностей силы тяжести при помощи группы статических гравиметров высшей точности, например, ГНУ-КВ, Содин, Лакоста-Ромберг или Синтрекс, с погрешностью не более 0,003 мГал.

Высоты ФП определяют из нивелирования 1 класса и, как исключение, II класса; высоты их пунктов-спутников - из нивелирования I и II классов и, как исключение, III класса. Для определения высот расположенных в подвалах или других неудобных для нивелирования местах, применяют специальные приемы,

обеспечивающие требуемую точность измерений (укороченные рейки и т.п.).

Плановое положение ФП (центра марки, заложенной в монолит) определяют по спутниковым наблюдениям с соответственной передачей координат от антенны к марке с наивысшей точностью. Плановое положение пунктов-спутников определяют по топографическим картам с погрешностью не более 100 м.

14.3 Государственная гравиметрическая сеть 1 класса

Государственная гравиметрическая сеть 1 класса состоит из основных пунктов и собственно пунктов 1 класса.

Построение сети основных пунктов 1 класса осуществляют исходя из следующих принципов:

- основные гравиметрические пункты 1 класса размещают по возможности равномерно на расстоянии 250-400 км один от другого;

- для измерения ускорения силы тяжести применяют баллистические гравиметры типа ГБЛ, маятниковые приборы типа "Агат" и статические гравиметры;

- при определении основных пунктов 1 класса относительными методами исходными служат фундаментальные пункты или основные пункты 1 класса, непосредственно связанные с ГПП и не менее чем с двумя другими фундаментальными пунктами;

- связи основных пунктов 1 класса должны образовывать замкнутые полигоны с числом вершин не более пяти; полигоны строятся таким образом, чтобы число передач значений силы тяжести от ГПП до любого основного пункта 1 класса не превышало трех;

- основные пункты, являющиеся третьими от ГПП по числу передач к ним значений ускорения силы тяжести, связываются непосредственно с подобными же (третьими) в других полигонах.

Каждый основной пункт 1 класса сопровождается пунктом-спутником, размещенным в ближайшем аэропорту на расстоянии, не превышающем 60 км, и контрольными реперами. Пункты-спутники предназначаются для удобства связи пунктов 1 класса с пунктами 2 и 3 классов. Кроме того, пункт-спутник обеспечивает сохранение значения ускорения силы тяжести в случае утраты основного пункта 1 класса.

Средняя квадратическая погрешность определения разности значений ускорения силы тяжести между двумя связываемыми основными пунктами 1 класса, или между одним из них и фундаментальным пунктом, при определении комплектом любой аппаратуры (маятниками или гравиметрами) не должна превышать 0,04 мГал. Аналогичная погрешность по одному маятниковому прибору комплекса не должна превосходить 0,07 мГал, а по гравиметру - 0,09 мГал. Эти погрешности вычисляют как средние квадратические величины средних квадратических погрешностей связей двух смежных пунктов, полученных не менее чем по пяти последовательным связям, выполненным данной бригадой.

Расхождение результатов измерений, полученных по различным приборам комплекта, не должно превосходить для маятников 0,15 мГал, а для гравиметров - 0,20 мГал. Ср. кв. погрешность среднего результата связи основных пунктов 1 класса со своими пунктами-спутниками и ранее определенными пунктами 1 класса (в радиусе 60 км) не должна превышать 0,02 мГал.

Средняя квадратическая погрешность уравненного значения силы тяжести для основных пунктов 1 класса в принятой общегосударственной системе в целом по сети не должна превышать 0,03 мГал, а для отдельных пунктов - 0,05 мГал. Высоты основных пунктов 1 класса и их пунктов-спутников определяют из нивелирования I или II классов в соответствии с действующей инструкцией по нивелированию I, II, III и IV классов. Плановое положение пунктов определяют с погрешностью не более 100 м по картам масштаба 1:25000 и крупнее. В отличие от основных пунктов:

- пункты 1 класса определяют методом вставки в сеть основных пунктов 1 класса, уравненную совместно с ГФГС; при этом значения ускорения силы тяжести на соответствующих исходных пунктах принимают за "твердые";

- пункты 1 класса не имеют пунктов-спутников и контрольных реперов;

- в малонаселенных районах пункты 1 класса могут закрепляться совмещением их с пунктами триангуляции или нивелирными реперами. Гравиметрический пункт считается совмещенным с геодезическим центром, если гравиметрические приборы установлены от марки центра не далее 25 см по высоте и 5 м в плане, с последующей редукцией измеренного значения к марк.

При определении пунктов 1 класса в качестве исходных служат пункты ГФГС и основные пункты 1 класса, для которых средняя квадратическая погрешность уравниваемого значения силы тяжести не превышает 0,04 мГал.

Высоты пунктов 1 класса, в том числе совмещенных с пунктами триангуляции, но не привязанных к линиям нивелирования, определяют из геометрического нивелирования IV класса. В порядке исключения допускается тригонометрическое нивелирование.

15. Современные методы решения задач высшей геодезии

15.1 Геометрический метод космической геодезии

Если рассматривать методы космической геодезии в последовательности развития, то первым следует считать геометрический метод. Он основан на синхронном фотографировании ИСЗ на фоне звездного неба с двух пунктов (как минимум) на поверхности Земли, что позволяет определить составляющие вектора, соединяющего эти пункты. Множество таких векторов образует векторную пространственную сеть – спутниковую (космическую) триангуляцию. Обработка и уравнивание этой сети дают возможность определять координаты новых пунктов в системе координат исходных пунктов. Достоинством геометрического метода является возможность исключить из рассмотрения теорию движения ИСЗ и вместе с ней такие трудно учитываемые факторы как возмущения орбит ИСЗ, вызванные аномальным гравитационным полем планеты, влиянием притяжения Луны и Солнца, давлением солнечного излучения и т. п.. Недостатком данного метода является то, что в результате определяются только лишь относительные координаты новых пунктов в системе исходных пунктов, без привязки к центру масс Земли.

15.2 Динамический метод космической геодезии

Наиболее общим методом космической геодезии следует считать динамический метод, который основан на изучении изменения орбиты ИСЗ во времени. Динамический метод намного сложнее геометрического. В случае определения только лишь координат пунктов и поправок к элементам орбиты без определения и уточнения параметров гравитационного поля Земли, динамический метод называется орбитальным.

В орбитальном методе параметры гравитационного поля используются как исходные. В динамическом и орбитальном методе не требуется синхронизация наблюдений с наземных пунктов на ИСЗ. Динамический метод позволяет получить положение пунктов в единой для всей планеты системе координат с началом в центре масс Земли, что базируется на первом законе Кеплера: орбиты ИСЗ представляют собой эллипсы, у которых одним из

фокусом является центр масс Земли. Кроме того, динамический метод делает возможным получать точные параметры орбит ИСЗ и определять внешнее гравитационное поле Земли. Особенно важное значение имеет определение параметров гравитационного поля Земли, которые служат источником информации для изучения внутреннего строения планеты. Параметры определяются из анализа возмущений орбит ИСЗ.

Реализация динамического метода требует выполнения значительного объема вычислений для совместного определения координат наземных пунктов, элементов орбит ИСЗ и уточнения параметров моделей возмущающих сил методом последовательных приближений. Изучение гравитационного поля Земли основано на том факте, что спутник будет двигаться по правильной эллиптической или круговой орбите, не изменяющей положение в пространстве, при условии, что Земля имеет правильную сферическую форму с центральным гравитационным полем. Наличие у Земли экваториального вздутия (сжатия), нарушает центральность ее гравитационного поля и искажает строго эллиптическое движение ИСЗ. При этом близкие к Земле ИСЗ из-за не центральности притяжения Земли имеют в 1 млн. раз большие искажения, чем Луна. Дополнительно искажения в движение ИСЗ вносят Луна и Солнце. Из сил, имеющих негравитационную природу, учитываются сопротивление атмосферы и солнечная радиация. Искажения орбит проявляются в возмущении ее элементов, учет которых и позволяет решать задачи по изучению гравитационного поля Земли.

15.3 Спутниковое нивелирование

В данном методе, называемом еще спутниковой альтиметрией, с использованием установленного на ИСЗ высотомера измеряют кратчайшее расстояние между спутником и поверхностью океана по нормали к его мгновенной поверхности, что дает возможность определить геоцентрический радиус-вектор точек поверхности морей и океанов. Измерение высот при известной орбите обеспечивает практически непосредственное получение высот геоида. Именно данный метод совершил прорыв в точности определения детальных характеристик гравитационного поля Земли. Учитывая, что спутниковое нивелирование основано на измерении расстояний до мгновенной (реальной) поверхности

океана, которая не совпадает со средним его положением и поверхностью геоида, становится очевидным возможность применения метода для изучения топографии мирового океана. Отсюда следует и тот факт, что для определения поверхности геоида необходимо построение моделей топографии океана, от точности построения которых во многом зависят наши знания об уровне поверхности.

Вместе с тем главным источником ошибок измерений, помимо параметров океана, являются несовершенство конструкции радиовысотомера и метеоусловия.

Систематические приборные поправки радиовысотомера могут быть определены метрологически на эталонных океанических полигонах. Случайная составляющая приборной погрешности радиовысотомера может в перспективе снижена до 0,05 м.

Ошибки, вызванные тропосферной рефракцией фронта радиоволн при прохождении импульса, могут достигать 5 м. Большую часть этих ошибок исключают, измеряя температуру, давление и влажность воздуха над океаном вблизи района нивелирования. При тщательном учете метеофакторов, ошибка будет находиться на уровне 0,08 м.

Для ослабления влияния параметров поверхности океана используют статистические данные высоты волны на различных акваториях по временам года. Выявлено, что при эффективной высоте волн в 12 м высота ИСЗ от среднего уровня океана уменьшается на 1,8 м. Установлено, что в Северной Атлантике наиболее точные определения могут быть выполнены в летние месяцы.

За сутки можно отnivelировать два профиля геоида, а за год 20 раз осуществить нивелирование поверхности Мирового океана. Поэтому планирование и выполнение планетарного спутникового нивелирования, периодическое эталонирование радиовысотомеров относятся к важнейшим научно-техническим и производственным задачам государственного масштаба.

К сожалению, в научной литературе спутниковое нивелирование называют иногда спутниковой альтиметрией, делая упор на техническую составляющую получения данных, так как приборы для измерений носят название альтиметров. В принципе, способ получения информации не влияет на ее сущностной момент – геопространственная информация остается таковой независимо от того, то ли она получена с помощью тахеометра, то ли лазер-

ным сканированием или из спутниковых наблюдений. Термин «спутниковое нивелирование» правильно отражает сущность нового способа определения высоты геоида, так же как астрономо-гравиметрическим нивелированием называют традиционный способ определения высот квазигеоида по наземным астрономо-геодезическим и гравиметрическим данным.

Векторное уравнение спутникового нивелирования имеет вид:

$$r = r_0 + h .$$

Следовательно, во-первых, если при известном значении геоцентрического радиус-вектора r радиовысотомера на ИСЗ измерен вектор h , то можно определить геоцентрический радиус-вектор r_0 подспутниковой точки геоида; во-вторых, если задан геоид и измерен вектор h , то можно определить геоцентрический радиус-вектор r высотомера.

15.4 Лазерная локация Луны

Суть метода состоит в измерении расстояний между двумя точками на поверхностях Земли и Луны соответственно посредством лазерной локации с использованием уголко-вых отражателей, находящихся на поверхности Луны. Научное значение таких экспериментов состоит в уточнении гравитационной постоянной и проверки теории относительности; уточнении ряда параметров движения динамической системы Земля-Луна; получении новых данных о физических свойствах и внутреннем строении Земли и Луны, и т. Метод лазерной локации Луны имеет и другие достоинства, в частности, он позволяет установить геодезические связи удаленных пунктов друг с другом, с высокой точностью определять координаты станций наблюдений в единой системе координат, отнесенной к центру масс Земли, исследовать неравномерность вращения Земли и движение полюса, а также решать ряд геодинамических задач. Находящиеся на поверхности Луны уголко-вые отражатели позволяют измерять расстояния с точностью единиц сантиметров.

15.5 Радиointерферометрия

Широкое распространение в настоящее время получил метод радиointерферометрии со сверхдлинной базой (РСБН). В нем одновременно наблюдаются точечные внегалактические радиоисточники с помощью радиотелескопов, разнесенных на тысячи километров. Метод РСБН в геодезии позволяет с высокой точностью определять длины и направления хорд, соединяющих антенны радиointерферометров. Наличие сети высокоточных базисов дает возможность уточнить параметры отсчетного эллипсоида. Эффективность метода РСБН существенно повышается при его сочетании с методами космической геодезии при установке на ИСЗ искусственных радиоисточников. По своей сущности метод РСБН относится к геометрическому методу. Обеспечивая высокоточное определение относительного положения точек земной поверхности, он позволяет осуществить привязку к центру масс Земли и определять параметры гравитационного поля.

Наилучшее решение задач высшей геодезии дает сочетание классических и современных методов.

Учитывая постоянную потребность науки и практики в повышении точности геодезической информации, необходимо устанавливать системы координат и параметры гравитационного поля Земли на каждую эпоху, длительность которой имен устойчивую тенденцию к снижению.

16. Спутниковые навигационные системы

16.1 Назначение спутниковых систем

Навигационные спутниковые системы предназначены для определения местоположения, скорости движения, а также точного времени морских, воздушных, сухопутных и других видов потребителей. NAVSTAR и ГЛОНАСС - системы двойного назначения, изначально разработанные по заказу и под контролем военных для нужд Министерств обороны и поэтому первое, и основное назначение у систем стратегическое, второе назначение указанных систем гражданское. Исходя из этого, все действующие ныне спутники передают два вида сигналов: стандартной точности для гражданских пользователей и высокой точности для военных пользователей (этот сигнал закодирован и доступен только при предоставлении соответствующего уровня доступа от Министерства обороны). Навигационные системы являются независимыми (полностью автономными) и беззапросными (пользовательская аппаратура только принимает сигнал, не посылая запрос на спутник) и используют сигналы на основе «псевдошумовых последовательностей», применение которых придаёт им высокую помехозащищённость и надёжность при невысокой мощности излучения передатчиков.

16.2 Состав системы

Навигационные системы NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС состоят из трёх основных подсистем: подсистема космических аппаратов; подсистема контроля и управления; навигационной аппаратуры потребителей.

16.2.1 Подсистема космических аппаратов

Спутники, разбитые по группам, вращаются в своих орбитальных плоскостях на неизменной средневысотной орбите, на постоянном расстоянии от поверхности Земли. Для получения сигнала в любое время, в любой точке земного шара и в 100 километрах от поверхности Земли требуется 24 спутника. Если разделить условно, то по 12 спутников на каждое полушарие. Орбиты этих спутников образуют “сетку” над поверхностью Земли,

благодаря чему над горизонтом всегда гарантированно находятся минимум четыре спутника, а созвездие построено так, что, как правило, одновременно доступно не менее шести. Полностью развёрнутая спутниковая система имеет также резервные спутники, по одному в каждой плоскости, для “горячей” замены (в случае выхода основного спутника из строя они могут быть оперативно введены взамен неисправного). Резервные спутники не бездействуют и также участвуют в работе системы, улучшая точность позиционирования и обеспечивая достаточную избыточность. Они также могут быть использованы и для увеличения степени покрытия отдельного региона. Спутники в ограниченных пределах могут быть перегруппированы по команде с наземной станции управления, но в связи с ограниченным запасом топлива на борту спутника делается это только в исключительных случаях. При необходимости в течение срока службы происходит лишь небольшая коррекция движения. На борту спутника располагаются несколько эталонов времени и частоты. Работает всегда один эталон, а располагается их в спутнике несколько (от трёх до четырёх).

16.2.2 Подсистема контроля и управления

Эта система состоит из: центра управления навигационной системой со своим мощным вычислительным центром; развёрнутой сети станций измерения управления и контроля, связанных между собой; центра управления каналами связи и наземного эталона времени. В задачи данной подсистемы входит контроль правильности функционирования спутников, непрерывное уточнение параметров орбит и выдача на спутники временных программ, команд управления и навигационной информации. При пролёте спутника в зоне видимости станции измерения, управления и контроля, она осуществляет наблюдение за спутником, принимает навигационные сигналы, производит первичную обработку данных и производит обмен данными с центром управления системой. На главной станции происходит обработка и вычисление всех поступающих от сети управления данных их математическая обработка и вычисление координатных и корректирующих данных, подлежащих загрузке в бортовой компьютер спутника.

16.2.3 Навигационная аппаратура потребителей

Состоит из навигационных приемников и устройств обработки, предназначенных для приема навигационных сигналов спутников и вычисления собственных координат, скорости и времени. Области применения спутниковых систем безграничны: потребности Министерства обороны; гражданская авиация; морской и речной транспорт; геодезия и картография; строительство; наземный транспорт; системы безопасности; спорт; сельское хозяйство; спасательные работы; частное использование.

16.3 Принцип работы спутниковой системы

Задача вычисления своего местоположения пользователем является достаточно сложной, так как для вычисления собственных координат на местности необходимо вычислить координаты нескольких спутников, т.е. знать их точное местоположение относительно приёмной аппаратуры. Спутники постоянно движутся, соответственно координаты постоянно меняются. Для оперативного просчёта и уменьшения вычислительной мощности размеров и стоимости пользовательской аппаратуры, вычисление максимально возможного объема данных было возложено на наземный комплекс управления, в котором по результатам наблюдений за спутниками просчитывается прогноз параметров орбиты в фиксированные (опорные) моменты времени и во время сеансов связи передаются на спутник. Зная предполагаемые параметры орбиты и точные координаты спутника в опорной точке можно вычислить координаты спутника в любой произвольный момент времени. Спрогнозированные параметры орбиты и их производные называются эфемеридами. Набор сведений, применяемых для поиска видимых спутников и выбора оптимального созвездия и, содержащих сведения о текущем состоянии навигационной системы в целом, включая “загрублённые” эфемериды, называются альманахом. Передатчики, находящиеся на спутнике в беспрерывном режиме на высокой частоте передают навигационные сообщения, содержащие эфемериды с метками времени и альманахом. Пользовательская аппаратура, принимая такое навигационное сообщение и опираясь на заложенный в памяти предыдущий альманах, максимально быстро и точно определяет собственные координаты, при необходимости выводя их на средства

отображения информации. Вычислив координаты спутника, зная точное расстояние от спутника до земли и эталонное время распространения радиосигнала, приёмная аппаратура сможет вычислить расстояние от спутника до пользовательского приёмника, а вычислив расстояние до нескольких спутников, можно будет определить своё местоположение. Задача, которую мы решили чисто теоретическая, на практике всё намного сложнее. Например, существенно влияние ионосферы, где скорость сигнала замедляется, естественные и искусственные препятствия для прохождения радиоволн. Сигнал имеет свойство отражаться от поверхности, в связи с этим приходится решать одновременно несколько задач и корректировать сигнал от спутников с помощью наземных станций WAAS EGNOS и других беспроводных технологий Wi-Fi, GSM. Но, даже имея самый современный приёмник для гражданского применения, максимальная точность, на которую можно рассчитывать, используя группировку NAVSTAR, составляет порядка 1 метра. Для повышения точности используют относительные методы, которые нашли широкое распространение в геодезии и позволили определять пространственное положение пунктов с точностью единиц сантиметров.

16.4 Построение глобальной геодезической сети

Характерные для современных спутниковых систем позиционирования особенности, проявляющиеся в возможности точного и оперативного определения координат пунктов, расположенных в пределах всего земного шара, были использованы в последние десятилетия для создания глобальной опорной геодезической сети. Систематические спутниковые наблюдения, проводимые на пунктах глобальной сети, позволяют периодически уточнять координаты этих пунктов, вычислять точные значения эфемерид наблюдаемых спутников, входящих в рассматриваемые системы позиционирования. Кроме того, они позволяют изучать геодинамические явления, происходящие в земной коре, в пределах всего земного шара, и в таких составных частях атмосферы, как ионосфера и тропосфера. Так по данным Потсдамского центра анализа, полученным с использованием GPS, смещение пунктов мировой сети за пятилетие составило 0,03 м. Точность определения координат пунктов, входящих в глобальную опорную геодезическую сеть, на начальной стадии характеризовалась

средними квадратическими ошибками на уровне около 15 мм в плане и около 35 мм по высоте. По мере совершенствования методики наблюдений и обработки, отмеченные ошибки были уменьшены до 5 мм в плане и 8 мм по высоте.

16.5 Построение континентальных геодезических сетей

Стремление к созданию на отдельных континентах геодезической координатной основы повышенной точности с учетом характерных для конкретных континентов факторов, оказывающих влияние на изменения с течением времени значений определяемых координат, обусловило целесообразность построения континентальных опорных геодезических сетей. Одним из примеров такой сети может служить Европейская геодезическая опорная сеть. Создание такой сети на базе использования спутниковых технологий, включающей в себя около 90 пунктов, было начато в конце 80-х годов. При ее построении с участием 16 европейских стран наряду с использованием GPS были предусмотрены измерения с помощью спутниковых лазерных дальномерных систем и радиоинтерферометров со сверхдлинной базой. Полученная при этом точность, базирующаяся на формализованном учете случайных ошибок измерений, оказалась на уровне менее 1 см по всем трем координатным осям. В то же время из сравнения с лазерными и интерференционными измерениями реальная точность оценивается на уровне нескольких сантиметров.

16.6 Построение государственной геодезической сети России на основе спутниковых технологий

Наряду с глобальной и континентальными геодезическими сетями, создаваемыми на основе применения спутниковых методов, аналогичные подходы используются и при построении национальных опорных геодезических сетей, охватывающих как территории отдельных стран, так и их составных частей. К числу таких стран относится и Россия, на территории которой в соответствии с Концепцией перехода топографо-геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений создается новая высокоэффективная государственная геодезическая сеть, базирующаяся на применении методов спутниковой геодезии. Концепция перехода топографо-

геодезического производства на автономные методы спутниковых координатных определений разработана с целью обеспечить наиболее рациональное и эффективное в существующих условиях практическое определение координат и высот пунктов земной поверхности на всей территории страны с точностями, требуемыми для решения возможно более широкого круга научно-технических и производственных задач. В соответствии с Концепцией указанная цель может быть достигнута, если на территории страны (или группы заинтересованных стран) будет существовать единая по точности сеть надежно закрепленных на местности геодезических пунктов со средними расстояниями между ними порядка 30 - 35 км (средняя плотность 1 пункт на 1000 км. кв.). В этом случае любой заинтересованный потребитель, располагающий как минимум двумя двухчастотными спутниковыми приемниками, может выполнять интересующие его координатные определения дифференциальным методом относительно пунктов указанной сети. По крайней мере один из этих пунктов всегда будет находиться на расстоянии не далее 20 - 25 км от места определений. Именно до таких расстояний полностью реализуется инструментальная точность современных спутниковых приемников при продолжительности наблюдений около часа. В менее обжитых районах плотность опорной сети может быть уменьшена до 1 пункта на 2000 км. кв. Отрицательное влияние на точность увеличивающихся расстояний между опорными пунктами и пунктами, определяемыми потребителями, можно компенсировать увеличением времени наблюдений. В малообжитых и труднодоступных районах допускается увеличение расстояний между пунктами опорной сети до 100 км. В этом случае для привязки развиваемых потребителем локальных сетей к единой государственной системе координат с требуемой точностью, возможно увеличение продолжительности наблюдений до нескольких часов и даже суток. Взаимное положение опорных пунктов должно быть известно со средними квадратическими ошибками не более 1,0—1,5 см. Такая опорная сеть в настоящее время может быть создана существующей спутниковой аппаратурой при следующих условиях:

- 1) создаваемая сеть будет опираться на построения более высокого уровня, обеспечивающие исключение деформаций регионального и глобального характера;

2) создаваемая сеть будет отнесена к единой для всей страны геоцентрической системе координат.

Концепция послужила базовым документом при разработке «Основных положений о государственной геодезической сети» и «Инструкции по построению государственной геодезической спутниковой сети», в соответствии с которыми предусмотрено создание на территории России и других заинтересованных государств трехуровневой или классов государственной геодезической спутниковой сети:

- 1) фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС);
- 2) высокоточная геодезическая сеть (ВГС);
- 3) спутниковая геодезическая сеть 1 класса (СГС-1).

Постоянно действующие пункты ФАГС: Билибино, Зеленчук, Екатеринбург, Иркутск, Магадан, Менделеево, Нижний Новгород, Новгород, Новосибирск, Норильск, Петропавловск-Камчатский, Пулково, Светлое, Тикси, Хабаровск, Москва (ЦНИИГАиК), Южно-Сахалинск, Якутск.

17. Ретроспектива расширения знаний о фигуре и размерах Земли

17.1 Земной шар

Отметим немаловажный факт, что знания о фигуре, размерах и гравитационном поле Земли всегда опережали потребности практики. Вектор развития геодезии от простого к сложному уникален в том смысле, что первоначальное представление о Земле имеет практическое значение и по настоящее время. Так решение практически всех инженерных задач на небольших территориях в сотни квадратных километров производится на плоскости в проекции Гаусса. Формула масштаба изображения, выведенная еще в 19 веке, позволяет строго учитывать поправки за редукцию длин линий с поверхности Земли на плоскость.

Представления о шарообразности Земли присутствовало у древних греков еще в 5-6 веке до нашей эры, а впервые достаточно точно ее размеры определил Эратосфен (276-194 годы до н.э.). Во второй половине 17 века французский астроном Пикар, используя метод триангуляции, измерил под Парижем длину дуги в 1 градус. Она оказалась равной 111,21 км и отличается от современных измерений всего на 10 км. Работами Пикара завершается этап представления о шарообразности Земли.

17.2 Сфероид

В 1687 году И.Ньютон теоретически доказал, что Земля имеет форму сфероида, образованного вращением эллипса вокруг малой оси. Однако потребовалось более полувека, прежде чем идея нашла практическое подтверждение благодаря трудам французской Академии наук.

Таким образом, работами Синеллиуса и Пикара был обоснован и реализован геометрический метод изучения фигуры Земли, а трудами Ньютона положено начало физическому методу. Принятое в науке такое разделение методов не совсем корректно, так как измерения углов в том же геометрическом методе происходит в физическом поле Земли, а не в однородной среде, что и учитывается при обработке измерений.

Переход от плоскости к шару, от шара к однородному сфероиду, а затем к эллипсоиду с неравномерным распределением масс, сопровождался расширением понятийного аппарата. В качестве основных характеристик стали выступать большая полуось и сжатие эллипсоида, как отношение разностей полуосей к большой, а также первый и второй эксцентриситеты, в знаменатели формулы вычисления которых входят соответственно большая и малая полуоси.

В качестве основных стали применяться геодезические координаты : долгота (плоский угол между плоскостью начального меридиана и меридиана искомой точки) и широта (угол, образованный геоцентрическим радиусом-вектором искомой точки и плоскостью экватора). Нормаль (перпендикуляр к касательной, проходящий через точку касания) и отвесная линия (определяет направление действия силы тяжести) стали основными в высшей геодезии.

В решении широко применяемых прямых и обратных задач используются значения азимута и геодезической линии, достаточно малые дуги которой являются кратчайшими путями между концами этих дуг на поверхности эллипсоида, При решении такого рода задач учитывается влияние уклонение отвесной линии, составляющие которой и азимут входят в формулу вычисления поправки в направление. Таким образом, при переходе от поверхности эллипсоида на плоскость соответственно геодезическая линия представляется прямой, а азимут - дирекционным углом, при вычислении которого основным членом является величина сближения меридианов – плоский угол между касательной к изображению меридиана данной точки и линией, параллельной оси абсцисс. Установление соответствия между одноименными точками на поверхности эллипсоида и на плоскости, аналитической зависимости между ними осуществляется посредством проекций, из которых наибольшее распространение получила проекция Гаусса.

17.3 Геоид. Гравиметрический метод изучения фигуры Земли

Положив начало гравиметрическому методу изучения Земли, И.Ньютон исходил из предположения о равномерном распределении масс в теле Земли, а изменение (уменьшение) ускорения

силы тяжести от полюсов к экватору связывалось только со сплюснутостью Земли и центробежной силой вращения.

Позднее, в 1743 году Клеро доказал фундаментальную теорему для фигуры Земли, устанавливающую зависимость между распределением силы тяжести на поверхности Земли, ее сжатием и угловой скоростью вращения.

Дальнейшие исследования ученых, в том числе и российских, доказали, что форма Земли незначительно отстает от сфероидов, но эти отступления необходимо учитывать. Во второй половине 19 века мировая геодезическая наука пришла к выводу, что третьим приближением, и наиболее точным, является уровенная поверхность Мирового океана в состоянии покоя и равновесия и продолженная под материками. По предложению И.Б.Листинга ее стали называть геоидом, в переводе с греческого, землевидный.

Изучение фигуры геоида предполагает знание силы тяжести по всей поверхности Земли. В 1849 году английский ученый Дж. Г.Стокс первым доказал, что определение фигуры Земли принципиально возможно без знания закона распределения плотности масс. По теореме Стокса утверждается, что если известны общая масса планеты, ее угловая скорость вращения и уровенная поверхность силы тяжести, внутри которой заключены все притягивающие массы, то могут быть определены потенциал и его первые производные (составляющие силы тяжести) во внешнем пространстве и его первые производные независимо от распределения масс внутри поверхности, при которых форма поверхности и угловая скорость остаются неизменными. Решение этой задачи составляет так называемую проблему Стокса, которая решена в настоящее время для наиболее простых фигур: эллипсоида вращения и трехосного эллипсоида, что практически удовлетворяет потребности теории фигуры Земли и других планет солнечной системы.

Стоксом решена и обратная задача, состоящая в определении формы внешней уровенной поверхности силы тяжести и внешнего потенциала по известной угловой скорости вращения и заданным на этой поверхности значениям силы тяжести и ее потенциала.

Таким образом, поверхность геоида не удовлетворяет условиям теоремы Стокса, так как, во-первых, геоид не является внешней уровенной поверхностью (возвышаются массы матери-

ков), а, во-вторых, измерения силы тяжести производятся не на геоиде, а на поверхности Земли. Однако Стокс предполагал, что после введения в измеренные значения силы тяжести небольших поправок (редукций) поверхность геоида может быть определена по его формуле.

В 1928 году голландский ученый Венинг-Мейнис на основании формулы Стокса получил формулы для вычисления составляющих уклонений отвесных линий как функции силы тяжести. Этим самым был сделан очередной шаг в области изучения фигуры Земли физическим методом.

Огромные работы в СССР в тридцатые годы 20 века, проводимые под руководством Ф.Н. Красовского, завершились утверждением постановлением Совета министров СССР от 7 апреля 1946 года параметров эллипсоида, названного именем Красовского. Красовскому принадлежит идея отсчитывать высоты по нормали к поверхности эллипсоида и по ним редуцировать измерения с поверхности Земли на референц-эллипсоид, где и производить их обработку. Возникла задача решения редуциционной проблемы, которая была осуществлена М.С. Молоденским, разработавшим метод астрономо-гравиметрического нивелирования, что позволило достаточно точно определить поверхность, названную квазигеоидом. Высоты точек над данной поверхностью называются нормальными, а их сумма с аномалией высоты дает геодезическую высоту. Молоденский доказал, что задача определения фигуры Земли без знания закона распределения плотности внутри Земли не может быть решена точно. По его теории фигура и внешнее гравитационное поле Земли изучаются путем их малых отклонений от фигуры и нормального поля силы тяжести уровня эллипсоида.

На поверхности уровня эллипсоида значение силы тяжести, как равнодействующая силы притяжения и центробежной силы, изменяется с широтой точки наблюдения.

Гравитационное поле Земли характеризуется потенциалом силы тяжести, который определяется как сумма нормального потенциала на поверхности уровня эллипсоида и возмущающего потенциала.

Потенциалом или потенциальной функцией называется такая функция, частные производные которой по координатам притягивающей точки равны составляющим силы притяжения по соответствующим осям координат. В общем производная от потен-

циала притяжения по любому направлению равна составляющей силы тяжести по этому направлению.

Потенциал на уровненой поверхности постоянен, поэтому земной эллипсоид, на поверхности которого потенциал силы тяжести всюду и имеет одно и то же значение, называется уровнем. Линии, пересекающие уровенные поверхности ортогонально, называются силовыми.

Возмущающий потенциал вычисляют по аномалиям силы тяжести, представляющими собой разность значений силы тяжести на поверхности Земли и ее нормальным значением на поверхности уровневого эллипсоида. Различают аномалии силы тяжести в свободном воздухе, аномалии Буге, а также аномалии Фая, как суммарную поправку за свободный воздух и влияние рельефа. Аномалии силы тяжести используются и для вычисления отклонений отвеса, представляющих собой угол между отвесной линией и нормалью к поверхности эллипсоида в данной точке.

18. Теоретические основы установления и распространения систем координат

18.1 Проекция Гаусса

Обозначенная проекция является конформной, где сохраняется форма фигур в бесконечно малой области. Главным свойством равноугольных проекций является независимость линейных искажений от азимута, т.е. масштаб изображения в каждой точке зависит только от координат и не зависит от направления. Это свойство позволяет довольно просто учитывать линейные искажения.

В проекции Гаусса применяется декартова прямоугольная система координат, которая в свою очередь используется в отдельных зонах, ограниченных меридианами, отстоящими от осевого меридиана на 3 или 1,5 градуса. В каждой зоне за ось абсцисс (x) принимается осевой меридиан, а за ось ординат (y) – экватор.

Масштабные искажения в проекции Гаусса довольно велики по сравнению с другими проекциями, однако простота их вычисления и высокая точность в пределах даже шестиградусной зоны являются основным ее преимуществом.

В формуле масштаба изображения отсутствует абсцисса, поэтому по оси x вообще отсутствуют искажения. Они возрастают по мере удаления от осевого меридиана к краям зоны пропорционально квадрату удаления.

Геодезические линии эллипсоида изображаются на плоскости в проекции Гаусса в виде сложных кривых, практическое использование которых затруднительно. Поэтому такие кривые заменяют хордами, соединяющими конечные точки изображения. В связи с этим возникает задача вычисления поправки за кривизну изображения как угла между изображением геодезической линии и хордой. Знак поправки зависит от знака разности абсцисс и знака ординат. Сумма поправок в углы сферического треугольника за кривизну изображения (сферический избыток) всегда положительна, а сумма углов фигур на эллипсоиде всегда больше их стандартных значений на плоскости. Сферический избыток не входит в формулу перехода от геодезического азимута к дирекционному углу.

Что касается длин линий, то разность между длиной изображения геодезической линии в проекции Гаусса и стягивающей хорды столь мала даже для длин линий в десятки километров, что не учитывается при построении ГГС.

При редуцировании длин линий с эллипсоида на плоскость в проекции Гаусса поправка за масштаб изображения всегда положительна, т.е. изображение линии на плоскости всегда больше чем ее значение на эллипсоиде.

18.2 Методы создания государственной геодезической сети

При построении государственной геодезической сети, представляющей собой совокупность геодезических пунктов, расположенных равномерно по всей территории и закрепленных на местности специальными центрами, обеспечивающими их сохранность и устойчивость в плане и по высоте, долгое время доминировал метод триангуляции, представляющий собой построения в виде треугольников с измеренными углами, Лишь к середине 20 века с появлением точных радиодальномеров, а затем и светодальномеров в практике

Создания геодезических сетей стали применяться методы полигонометрии и трилатерации. В полигонометрических ходах последовательно от исходного начального до конечного пункта измеряются длины сторон и углы между точками хода, а в трилатерации измеряются стороны в геометрических фигурах (чаще геодезических четырехугольниках и треугольниках). В полигонометрии реализуется прямая геодезическая задача, когда по известным координатам исходного пункта и измеренным длине линии и дирекционному углу вычисляются координаты определяемого пункта. Замечательно, что при развитии сетей методом триангуляции в треугольнике со всеми измеренными углами один является избыточным, а в трилатерации при измерении всех сторон в треугольнике избыточных измерений нет. Данное обстоятельство затрудняет контроль измерений и оценку точности в трилатерации и вынуждает создавать более сложные и трудоемкие построения.

Плотность пунктов ГГС в нашей стране составляет не менее одного на 50 км кв., а точность определения взаимного планового положения пунктов в результате заключительного уравнивания АГС по состоянию на 1995 год характеризуется средними квад-

ратическими ошибками: 0,02...0,04 м для смежных пунктов и 0,25...0,80 м при расстояниях от 1 до 9 тыс. км.

Разработка и практическая реализация спутниковых методов построения геодезических сетей позволила достичь точности взаимного положения пунктов космической геодезической сети при расстояниях между пунктами 1...1,5 тыс. км на уровне 0,2 м...0,3 м, а для доплеровской сети при дальностях 500...700 км средние квадратические ошибки составили 0,4...0,6 м.

18.3 Государственная нивелирная сеть Российской Федерации

Особенностью построения пространственной государственной геодезической сети является раздельное определение плановых координат и высот. Высоты в нашей стране отсчитываются от нуля Кронштадского футштока, как точки отсчета геодезических и нормальных высот.

Для распространения единой системы высот усилиями многих поколений геодезистов создана государственная нивелирная сеть, которая по точности и технологиям построения подразделяется на I, II, III, и IV классы, где первый наивысший. Нивелирная сеть II класса строится внутри полигонов I класса отдельными линиями и в виде системы линий с узловыми точками, образуя полигоны. Высотные сети I, II классов должны повторно нивелироваться через 15 лет. Внутри полигонов II класса аналогично создается сеть III класса, характеризуемая случайной средней квадратической ошибкой в 5 мм на 1 км хода. Периметры нивелирного хода III класса для застроенных территорий городов не должны превышать 25 км.

Наиболее жесткие требования при проложении нивелирных ходов предъявляются в I и II классах. Так максимальная длина луча нивелирования для I класса составляет всего 50 м, а его высота над подстилающей поверхностью должна быть не менее 0,5 м.

В основе классификации высот лежит отсчетная поверхность, которая может быть эллипсоидом (геодезические высоты), квазигеоидом (нормальные высоты) или геоидом (ортометрические высоты). Под геоидом понимается фигура Земли, образованная уровенной поверхностью, совпадающей с поверхностью Мирового океана в состоянии полного покоя и продолженная под

материками. Высота точки над поверхностью геоида называется ортометрической. Для ее вычисления требуется точное знание гравиметрического поля, значение силы тяжести по всей длине отвесной линии от определяемой точки до геоида, что практически невозможно.

Вычисляются точно без привлечения различных гипотез о распространении плотности масс в Земле нормальные высоты и аномалия высоты.

С развитием спутниковых технологий стало возможным распространять высоты быстро и менее затратно. Однако точность определения высот данным методом уступает на порядок геометрическому нивелированию. Как и точности определения плановых координат. Дальнейшее повышение точности определения высот спутниковым методом связано с созданием локальных моделей внешнего гравитационного поля Земли.

18.4 Высокоточная гравиметрическая сеть Российской Федерации

Одну из главных задач высшей геодезии, изучение гравитационного поля Земли во времени, решает государственная фундаментальная гравиметрическая сеть (ГФГС), средняя квадратическая ошибка абсолютных определений силы тяжести на которых баллистическим гравиметром не должна превышать 0,008 мГал. Принцип действия баллистического гравиметра состоит в измерении времени. Фундаментальная гравиметрическая сеть сгущается пунктами государственной гравиметрической сети (ГГС), которые в целях сохранения неизменности положения и обеспечения условий наблюдения должны быть удалены от шоссе и улиц с интенсивным движением на 100м. Пункты ГГС определяются из относительных определений, как правило, статическими гравиметрами, типа ГАГ. Основную ошибку в определении силы тяжести в статических гравиметрах вносит уход места нуля гравиметра, обусловленный нестабильностью во времени чувствительного элемента (растяжением пружины). Поэтому продолжительность рейса приходится ограничивать, так для гравиметра ГАГ-2 он составляет 8 часов, а в ходе обработки учитывать уход места нуля-пункта, полагая, что его изменение во времени происходит по линейному закону. По этой же причине для выполнения редукации измерений силы тяжести к центру

марки должны применяться стабильные гравиметры, у которых смещение нуль-пункта должно быть не более 0,5 мГал в сутки. В связи со значительным изменением силы тяжести с высотой, так вертикальный градиент нормального значения силы тяжести составляет 0,3086 мГал/м, при измерениях высокие требования предъявляются к определению высоты прибора и приведению в горизонтальное положение места наблюдения. Верхняя грань всех центров пунктов должна иметь отклонение от горизонтальной плоскости на угол не более 1 градуса, а высота прибора относительно гравиметрического пункта определяется со средней квадратической ошибкой 2 мм.

Вторым существенным недостатком статических гравиметров является ограничение по диапазону измерений, из-за чего гравиметры периодически приходится перестраивать, применяя соответствующие методики наблюдений. Данное обстоятельство необходимо учитывать при продолжительных рейсах, вытянутых с юга на север (или обратно), так как на Северном полюсе величина нормального значения силы тяжести максимальна, а на экваторе имеет минимальное значение.

18.5 Современные методы изучения формы, размеров и внешнего гравитационного поля Земли

Практически каждая крупная по территории держава принимает для целей картографирования собственный референц-эллипсоид и устанавливает национальную систему координат. Для изучения фигуры, размеров и внешнего гравитационного поля Земли в целом национальные геодезические службы в рамках международного сотрудничества принимают общеземную систему координат, а за отсчетную поверхность общеземной системы координат принимается уровенный эллипсоид. Разворот национальных систем координат относительно общеземной минимален и не превышает нескольких угловых секунд. За начало отсчета долгот принимается практически во всех системах координат плоскость Гринвичского меридиана.

Наибольший прогресс в решение задач высшей геодезии внес запуск космических аппаратов. Появились новые дисциплины космическая и спутниковая геодезии, а в каждой из них обособленные методы изучения формы, размеров и внешнего гравитационного поля Земли. Так метод космической геодезии, в кото-

ром учитывается влияние гравитационного поля Земли на ИСЗ, получил название динамического, а метод, в котором по нормали измеряют расстояние между спутником и поверхностью океана – спутниковой альтиметрией. Спутниковые методы значительно расширили понятийный аппарат высшей геодезии. В оборот вошли понятия: эпоха – момент времени, в который спутник находится в некоторой точке орбиты; рабочее созвездие – совокупность спутников, участвующих в решении поставленной задачи в данный момент времени; миссия – процедура установки в приемнике параметров условий наблюдений спутников в режиме выполнения работы; постобработка – окончательная обработка данных с целью получения координат пунктов.

Точные методы определения координат точек, то есть относительное получение их друг относительно друга, в спутниковых методах, как и в методе радиоинтерферометрии, является в настоящее время наиболее массовым и востребованным.

Словарь терминов

Абрис – план местности, выполненный вручную с указанием расположения местных объектов и характерных форм рельефа с обозначением пикетов и их номеров. Используется при тахеометрической и кадастровой съёмке.

Азимут - в геодезии угол между направлением на север и направлением на какой-либо предмет. Отсчитывается по часовой стрелке. В зависимости от направления на север, различают: магнитный (отсчитываемый от магнитного меридиана), геодезический (отсчитываемый от геодезического меридиана) и астрономический (отсчитываемый от астрономического меридиана) азимуты.

Аэрофотосъёмка – фотографирование поверхности (моря и суши) с самолёта или вертолёта специальными камерами.

Аэроэлектроразведка – геофизический метод разведки, основанный на зависимости напряженности и поляризации электромагнитных полей от электрических свойств горных пород.

Визирная линия - луч, проходящий через глаз наблюдателя и точку, располагающуюся в створе луча.

Визирная ось - в зрительной трубе геодезического прибора линия, соединяющая глаз наблюдателя и перекрестие сетки нитей.

Визирная цель - точка или предмет, обычно цилиндрической формы, предназначенный для визирования (наведения) геодезического прибора.

Возмущающий потенциал – разность между потенциалом силы тяжести Земли и его нормальным значением на поверхности уровенного эллипсоида.

Высота в Балтийской системе высот - высота точки относительно поверхности квазигеоида. Ее называют также нормальной высотой.

Высота геодезическая - расстояние по нормали от точки до поверхности земного эллипсоида.

Высота нормальная - см. Высота в Балтийской системе высот.

Высотный репер - см. Репер.

Геодезический пункт - закреплённая на местности физическая точка, координаты которой определены геодезическими методами. Физическая точка обычно размещается на марке, которая

образует центр пункта. Геодезический пункт может быть окружён окопкой, и на нём может быть установлен наружный знак.

Геодезия – наука об определении фигуры, размеров и гравитационного поля Земли, измерении объектов на местности о пространственном позиционировании и ориентировании объектов в заданной системе координат с использованием инструментальных методов для создания карт и планов, проведения хозяйственных мероприятий, проектирования и строительства сооружений, дорог, каналов и т. п.

Геоид - уровенная поверхность гравитационного поля Земли, на океанах и морях совпадающая с поверхностью невозмущённых водных масс и продолженная под островами и материками так, чтобы вектор силы тяжести в каждой точке был перпендикулярен этой поверхности.

Геология инженерная – отрасль геологии, изучающая верхние горизонты земной коры в связи с инженерной деятельностью человека. Круг рассматриваемых вопросов включает обоснование выбора места строительства, рекомендации по надёжности конструкции сооружений, мероприятий по борьбе с процессами, которые могут возникнуть при эксплуатации сооружений и др.

Гидрогеология – наука о подземных водах. Изучает происхождение, условия залегания, законы движения, свойства подземных вод и их хозяйственное значение.

Гидрология - наука, изучающая природные воды и протекающие в них закономерности.

Горизонталь - линия равных высот на топографической карте или топографическом плане.

Горизонтирование - процедура приведения геодезического прибора или инструмента в положение, когда вертикальная ось прибора совпадает с вектором силы тяжести или плоскость инструмента находится в горизонтальной плоскости.

Гравиметрическая связь пунктов - это измерение разности ускорения силы тяжести между пунктами.

Двойная коллимационная ошибка - см. Коллимационная ошибка.

Декартова (система координат) - прямолинейная система координат на плоскости или в пространстве (обычно с взаимно перпендикулярными осями и одинаковыми масштабами по осям).

Дирекционный угол - угол, измеряемый по ходу часовой стрелки от 0 до 360° между северным направлением вертикаль-

ной линии координатной сетки и направлением на определяемый объект.

Дистанционное зондирование – сбор информации об объекте или явлении с помощью регистрирующих приборов, не находящихся в непосредственном контакте с объектом наблюдения или изучаемым явлением. Дистанционное зондирование используется, например, для сбора информации об атмосфере и литосфере Земли, о дне морей и океанов, об объектах ближнего и дальнего космоса.

Жезл - в геодезии длинный прямой предмет, размер которого между концами известен. Используется для измерения расстояний.

Засечка - метод в геодезии, позволяющий получить координаты одного пункта. Засечки бывают прямыми и обратными, а по используемым приборам линейными и угловыми.

Зенитное расстояние – угол между отвесной линией и направлением на визирную цель. Угол отсчитывается «сверху – вниз», поэтому, зенитное расстояние направления, лежащего в плоскости горизонта равно 90° , лежащего выше горизонта – менее 90° , лежащего ниже горизонта – более 90° .

Зрительная труба геодезического прибора - небольшая увеличительная труба (телескоп) с увеличением 14 - 45 крат и возможностью фокусировки (наведения на резкость изображения) и сеткой нитей. Служит для точного наведения прибора на визирную цель.

Инженерные изыскания - изучение природных условий и факторов техногенного воздействия в целях рационального и безопасного использования территорий и земельных участков в их пределах, подготовки данных по обоснованию материалов, необходимых для территориального планирования, планировки территории и архитектурно-строительного проектирования.

Картография - это наука об исследовании, моделировании и отображении пространственного расположения, сочетания и взаимосвязи объектов и явлений природы и техногенной среды.

Квазигеоид - по материалам наземных наблюдений строго определяемая поверхность, на морях и океанах совпадающая с поверхностью геоида. Под островами и континентами отступает от поверхности геоида на величины в несколько сантиметров в равнинных районах и до двух метров в горных районах. Исполь-

зуется в Балтийской системе высот как поверхность, от которой отсчитываются нормальные высоты.

Кипрегель - угломерный прибор, позволяющий измерять вертикальные углы и определять превышения. В основании кипрегеля имеется линейка для прочерчивания направлений.

Коллимационная ошибка - ошибка в отсчёте по горизонтальному кругу теодолита, возникающая из-за несоблюдения геометрического условия - визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна оси вращения трубы. Разница в отсчётах на визирную цель, полученная при наблюдениях при двух положениях теодолита («круг лево» и «круг право») носит название двойной коллимационной ошибки.

Линейно-угловая сеть - метод, применяемый в геодезии для передачи координат от точки к точке. Геометрически представляет собой совокупность треугольников с измеренными углами и длинами сторон. Совмещает в себе методы триангуляции и трилатерации.

Марка - в геодезии объект, на котором находится физическая точка. Различают марку, как центр геодезического пункта, координаты которого соотнесены с физической точкой. Визирная марка - предмет, на физическую точку которой производится наведение геодезического прибора.

Меридиан - линия, соединяющая какие либо точки с заданными характеристиками. В геодезии различают магнитный, геодезический и астрономический меридианы. Магнитный меридиан - проекция силовой линии геомагнитного поля на поверхность Земли. Все магнитные меридианы представляют собой сложные кривые, сходятся в северном и южном магнитных полюсах Земли. Геодезический меридиан - линия сечения поверхности земного эллипсоида плоскостью, проходящей через оба полюса Земли. Астрономический меридиан точки представляет собой след сечения земной поверхности плоскостью, проходящей через направление отвесной линии в этой точке и параллельной оси вращения Земли.

Место зенита – в приборах, измеряющих зенитное расстояние (например, теодолит) - несоблюдение геометрического условия, требующего, чтобы диаметр $0^\circ - 180^\circ$ вертикального круга совпадал с отвесной линией.

Место нуля – в приборах, измеряющих угол наклона (например, теодолит, кипрегель) - несоблюдение геометрического

условия, требующего, чтобы диаметр $0^\circ - 180^\circ$ вертикального круга находился в плоскости горизонта.

Метрическая информация - в топографии числовые сведения, наносимые на топографическую карту или план: ширина дороги, длина и грузоподъёмность моста, высота деревьев в лесу и т. п.

Наружный знак геодезического пункта - сооружение над центром геодезического пункта, возводимое с целью поднять на заданную высоту визирную цель и, иногда, геодезический прибор. Наружные знаки различаются по конструкции и высоте: сигналы, пирамиды, туры, столбы и т. п.

Нивелир - геодезический прибор, позволяющий установить визирную линию в горизонтальной плоскости. Применяется для производства геометрического нивелирования.

Нивелирная рейка - длинная (до трех метров) прочная линейка с сантиметровыми или миллиметровыми делениями. Применяется для производства геометрического нивелирования.

Нивелирный башмак - специальная подставка, обычно стальная или чугунная, предназначенная для установки нивелирной рейки при работе на мягком, рыхлом и подвижном грунте.

Нивелирование - общее названия вида геодезических работ, при которых определяется превышение между точками с целью вычисления их высот в заданной системе.

Нивелирование барометрическое - метод получения превышения между точками, основанный на использовании разности в атмосферном давлении на разных высотах над поверхностью Земли.

Нивелирование геометрическое - метод определения превышения между точками, основанный на снятии отсчётов по нивелирным рейкам горизонтальной визирной линией.

Нивелирование гидростатическое - метод получения превышения между точками, основанный на использовании физического закона сообщающихся сосудов.

Нивелирование тригонометрическое - метод определения превышения между точками, основанный на измерении вертикального угла и расстояния между точками.

Нормальное значение силы тяжести – значение силы тяжести на поверхности уровенного эллипсоида.

Нормаль - в геодезии линия, перпендикулярная поверхности земного эллипсоида в данной точке.

Обратная геодезическая задача на плоскости - одна из основных геодезических задач, позволяющая по разностям координат двух точек вычислить расстояние и дирекционный угол между ними. При решении задач на поверхности эллипсоида по известным координатам определяется расстояние и два азимута с первой на вторую точку и со второй на первую.

Общеземной эллипсоид - земной эллипсоид, центр которого совпадает с центром масс Земли, а малая полуось совпадает с осью вращения Земли в пределах точности измерений, достигнутых на данном этапе развития геодезии..

Оптический центрир – устройство в теодолите, малая зрительная труба, для размещения теодолита точно над центром пункта.

Ориентирный пункт (ОРП) - вспомогательный геодезический пункт, располагающийся на некотором расстоянии от основного геодезического пункта. С основного геодезического пункта на ОРП определяется дирекционный угол. Служит для быстрого ориентирования геодезического прибора и для поиска центра геодезического пункта в случае утраты его внешних признаков.

Окопка - канава в грунте заданного размера, профиля и конфигурации, окружающая центр геодезического пункта и предназначенная для обозначения пункта на местности.

Осевой меридиан зоны - меридиан на поверхности земного эллипсоида, являющийся центральным в проекции Гаусса-Крюгера.

Отвес - устройство, позволяющее определить положение отвесной линии. Различают нитяной и оптический отвесы. Первый из них представляет собой груз на нити, второй - оптический прибор, устанавливающий визирную линию по линии действия силы тяжести.

Отвесная линия - линия, совпадающая с вектором силы тяжести в данной точке.

Ошибки измерений - самопроизвольно проявляющиеся изменения в результатах измерений (в том числе геодезических) из-за влияния различных факторов: инструментальные, личные, внешней среды и т. п. Различают ошибки случайные и систематические.

Ошибки систематические - ошибки, которыми отягощены результаты измерения и которые проявляются всегда, с одним знаком и одинаковые по абсолютной величине.

Ошибки случайные - ошибки, которые имеют результаты любых измерений, но у которых нельзя предсказать заранее знак и абсолютную величину.

Ошибка средняя квадратическая - характеристика качества произведённых измерений или точностная характеристика геодезического прибора. Теоретические положения по средней квадратической ошибке излагаются в курсе дисциплины «Теория математической обработки измерений».

Параллель (геодезическая) - линия на поверхности эллипсоида, получаемая сечением плоскости, перпендикулярной малой полуоси. В каждой своей точке параллель перпендикулярна меридиану. Экватор также является параллелью.

Пилон - в геодезии бетонный монолит, обычно в виде четырёхгранной усечённой пирамиды, в верхней части которого располагается марка. Служит основой центра геодезического пункта.

Пирамида - вид наружного знака геодезического пункта в виде сооружения из трех-четырех сходящихся к вершине столбов; в верхней части закреплена визирная цель.

Проверки геодезических приборов - работы, проводимые с целью проверки соблюдения заложенных в конструкцию прибора геометрических условий.

Полигонометрия - метод, применяемый в геодезии для передачи координат от точки к точке через решение прямых геодезических задач. Реализуется путём проложения полигонометрического хода с измеренными углами поворота и расстояниями между точками хода.

Полуось - в геодезии линия, характеризующая размер земного эллипсоида. Различают большую (от центра эллипсоида до экватора) и малую (от центра эллипсоида до полюса) полуоси. Для эллипсоида Красовского размер большой полуоси равен 6378245 м. Малая полуось земного эллипсоида совпадает с осью вращения Земли (для общеземного эллипсоида) или параллельна ей (для референц-эллипсоида).

Полюс - некая точка. В геодезии различают геомагнитный, геодезический и астрономический полюса (разделение условное). Геомагнитный полюс - точка, где сходятся силовые линии магнитного поля Земли. Геодезический полюс - точка, получаемая

пересечением малой полуоси поверхности эллипсоида. Астрономический полюс - точка на поверхности Земли, через которую проходит ось вращения планеты.

Полярное сжатие - см. Сжатие.

Поправка - некая величина, прибавляемая к другой величине, например, к результатам измерений, с целью уменьшения влияния ошибок.

Построитель плоскости - геодезический прибор, создающий лучом лазера горизонтальную и/или вертикальную плоскость.

Превышение - разность высот двух точек.

Проекция - геометрический термин, связанный с операцией проектирования (проецирования) изображения предмета из проецируемого пространства в проективное пространство, согласно правилам, описанным в виде математических зависимостей.

Проложение - в геодезии: 1) проекция реальной (наклонной линии) на проективную плоскость; линия, приведённая к горизонту; 2) термин, применяющийся к реализации некоторых методов геодезии, например, проложение полигонометрического хода, проложение нивелирного хода и т.п.

Прямая геодезическая задача на плоскости - одна из основных геодезических задач, позволяющая вычислить приращение координат по измеренным расстоянию и дирекционному углу. На поверхности эллипсоида в решении задачи определения координат второй точки участвуют расстояние и азимут с первой точки на вторую.

Разграфка - принятые правила деления земной поверхности на участки для создания топографических карт и планов. Важным является то, чтобы: границы соседних листов карты соприкасались без разрывов и перекрытий, каждый лист имел уникальное название (номенклатуру).

Редукция - поправка в измеренную величину, вводимая в случаях: 1) когда визирная цель находилась не над центром геодезического пункта; 2) проецирования результатов измерений, выполненных на физической поверхности Земли, в проективное пространство (см. Проекция).

Репер - вид геодезического пункта с определённой для его марки высотой. Различают грунтовые и стенные реперы.

Референц-эллипсоид - земной эллипсоид с заданными параметрами, центр которого находится вблизи центра масс Земли, а его малая полуось параллельна оси вращения Земли.

Сетка нитей - в зрительной трубе геодезического прибора стекло с выгравированными на нём линиями и располагающееся в фокальной плоскости окуляра. Служит для точного наведения прибора на визирную цель.

Сжатие (полярное сжатие) - в геодезии величина, характеризующая форму земного эллипсоида. Определяется как отношение разности большой и малой полуосей к размеру большой полуоси. Для эллипсоида Красовского сжатие равно 1:298,3.

Сигнал - вид наружного знака геодезического пункта, представляющий собой трёх-или четырёхгранную усечённую пирамиду. В ее верхней части располагают столик для инструмента, а над ним - визирную цель. Высота сигнала от 10 м и более.

Систематическая ошибка - см. Ошибки систематические.

Случайная ошибка - см. Ошибки случайные.

Средняя квадратическая ошибка - см. Ошибка средняя квадратическая.

Створ - в геодезии идущая от глаза наблюдателя прямая линия, на которой находятся две точки.

Сфероид - см. Эллипсоид.

Тахеометр – геодезический прибор, объединяющий теодолит и дальномер.

Теодолит - геодезический прибор, позволяющий измерять горизонтальные направления и вертикальные углы с точностью, характеризующейся конструкцией прибора. По конструктивной точности различают высокоточные, точные и технические теодолиты. Отдельный класс приборов составляют астрономические теодолиты.

Топографическая съёмка - совокупность работ по созданию топографических карт или планов местности посредством измерений расстояний, высот, углов и т. п. с помощью различных инструментов (наземная съёмка), а также получение изображений земной поверхности с летательных аппаратов (аэрофотосъёмка, космическая съёмка). Изображение рельефа и местных объектов производится в соответствии с принятыми условными знаками.

Топографический план - топографическая карта, снятая в масштабе от 1 : 5 000 до 1 : 500. Иногда встречаются топографические планы масштаба 1 : 200.

Триангуляция - метод, применяемый в геодезии для передачи координат от точки к точке. Геометрически представляет собой совокупность треугольников с измеренными углами.

Трилатерация - метод, применяемый в геодезии для передачи координат от точки к точке. Геометрически представляет собой совокупность треугольников с измеренными длинами сторон.

Тур - вид наружного геодезического знака, представляющего собой столб с визирной целью, установленный на марку. Для устойчивости столб обкладывается камнями в виде кургана. Применяется в горных районах на скальных основаниях.

Угол наклона – угол между плоскостью горизонта и направлением на визирную цель. Если направление выше плоскости горизонта – угол положительный, если ниже - отрицательный.

Уклонение отвесной линии - угол между нормалью к поверхности земного эллипсоида и отвесной линии.

Уравнивание - математическая процедура, предназначенная для нахождения поправок в измерения, соответствующих наибольшей плотности вероятности.

Условные знаки - совокупность стандартных изображений, использующихся для отображения рельефа и местных объектов на топографической карте или плане. Включает в себя правила нанесения графической, метрической и семантической информации.

Футшток - некая рейка (линейка) с делениями, установленная в урезе воды, на котором отмечают мгновенные её уровни. По многолетним наблюдениям можно вычислить среднее значение уровня. На острове Котлин (город Кронштадт) установлен Кронштадтский футшток. Нулевая отметка Кронштадтского футштока считается имеющей высоту в Балтийской системе высот равной нулю.

Центрирование - размещение геодезического инструмента или визирной цели над центром геодезического пункта (по отвесной линии).

Центрировка - поправка в измеренную величину, вводимая в случае, когда геодезический инструмент находился не над центром пункта.

Центрировочный лист - документ, создаваемый по особой методике в случаях, когда невозможно выполнить центрирование

геодезического инструмента и/или визирной цели. Необходим для определения величин центрировки и редукции.

Штатив - в геодезии подставка на трёх раздвижных ногах для установки приборов и визирных целей.

Экватор - в геодезии линия на поверхности эллипсоида, получаемая сечением плоскостью, перпендикулярной малой полуоси и проходящей через центр эллипсоида.

Эксцентриситет – величина несовпадения центров осей двух устройств, долженствующих быть соосными.

Электромагнитный дальномер – геодезический прибор, предназначенный для измерения расстояния, использующий для свойства электромагнитной волны (радио- или оптического диапазона).

Эллипсоид (сфероид) - геометрическая фигура, получаемая вращением эллипса вокруг одной из осей. При вращении вокруг малой оси получают эллипсоид, характеризующийся полярным сжатием.

Эталонирование - сравнение с эталоном. Процедура, производимая с некоторыми геодезическими приборами с целью выявления величины и знака систематической ошибки, присущей данному прибору. Выполняется с целью последующего введения поправки в результаты измерения, например, при сравнении длины рабочей мерной ленты с эталонной лентой. Величина несовпадения - систематическая ошибка. Эта ошибка, взятая с обратным знаком, - поправка.

Словарь персоналий

Бессель Фридрих Вильгельм (1784 -1846) – крупнейший немецкий математик и астроном. По материалам градусных измерений установил параметры земного эллипсоида, используемого и по настоящее время во многих странах мира в качестве референц-эллипсоида.

Бугер Пьер (1698 - 1758) - французский физик, астроном, специалист в области геодезической гравиметрии, один из руководителей Перуанской экспедиции по установлению формы и размеров Земли (1736 - 1746).

Вейнинг-Мейнис Феликс Андрис (1887-1966) – нидерландский геофизик и геодезист. На основании формулы Стокса получил формулы для вычисления уклонений отвеса, внес заметный вклад в повышение точности измерения гравитационного поля Земли.

Вернадский Владимир Иванович (1863 - 1945) - российский естествоиспытатель, академик Императорской Санкт-Петербургской академии наук, один из основателей и первый президент академии наук Украины, создатель многих научных школ, сторонник русского космизма. В круг его интересов входили геология и кристаллография, минералогия и геохимия, радиogeология и биология, биогеохимия, философия.

Витковский Василий Васильевич (1856 - 1924) - российский геодезист, преподавал в Военно-топографическом училище (Санкт-Петербург), автор учебников: «Практическая Геодезия», «Топография», «Картография», «Военная топография».

Волконский Пётр Михайлович (1776 - 1852) - начальник Главного штаба Его Императорского Величества, организатор производства геодезических и топографических работ в западных областях Российской империи, в том числе в южной части «дуги Струве».

Гаусс Карл Фридрих (1777 - 1855) - немецкий математик, астроном, геодезист и физик. Заложил основы высшей геодезии. Разработал основы теории ошибок измерений на основе теории вероятности, обосновал принцип наименьших квадратов для уравнивания геодезических измерений. Занимаясь исследованиями в области геометрии, разработал уникальную проекцию, названную его именем и используемую до сих пор для отображения земной поверхности и обработки геодезических построений.

Гельмерт Фридрих Роберт (1843 – 19170 – германский ученый-геодезист, иностранный член Российской Академии наук. Вывел сжатие земного эллипсоида из измерений силы тяжести, предложил формулу вычисления нормального значения силы тяжести на поверхности уровня эллипсоида.

Годен Луи (1704 - 1760) - французский астроном, академик Французской академии наук, один из руководителей Перуанской экспедиции по установлению формы и размеров Земли (1736 - 1746).

Дирихле Петер Густав Лежен – немецкий математик. Внес существенный вклад в математический анализ, теорию функций и теорию чисел, теорию потенциала и изучению поверхности геоида по известным значениям силы тяжести.

Кассини Жак (1677 - 1756) - французский астроном. Выполнил многочисленные астрономические и геодезические наблюдения в различных странах Европы. Участвовал в измерении дуги Парижского меридиана. В своих научных воззрениях отрицал закон всемирного тяготения, поэтому представлял Землю не в форме сплюснутого, а в форме вытянутого сфероида.

Кондамин Шарль Мари (1701 - 1774) - французский астроном, геодезист, путешественник, один из руководителей Перуанской экспедиции по установлению формы и размеров Земли (1736 - 1746).

Коперник Николай (1473-1543) - польский астроном, создатель учения о гелиоцентрической системе мира, автор сочинения «Об обращениях небесных сфер» (1543), запрещенного католической церковью с 1616 по 1828 год.

Красовский Феодосий Николаевич (1878-1948), российский астроном-геодезист, член-корреспондент АН СССР. Разработал программу развития государственной геодезической сети. Обработав результаты массовых высокоточных геодезических измерений, вывел параметры земного эллипсоида, названного его именем.

Крюгер Иоганнес Генрих Луис (1857 - 1923), немецкий геодезист. Развил идеи Гаусса в области проецирования земной поверхности (проекция Гаусса-Крюгера) и уравнивания геодезических измерений.

Лаплас Пьер-Симон (1749 - 1827) - выдающийся французский математик, физик, астроном, член Французского географического общества, специалист в области небесной механики и

дифференциального исчисления, один из создателей теории вероятности.

Лежандр Адриен Мари (1752 – 1833) – знаменитый французский ученый, один из авторов метода наименьших квадратов. Внес заметный вклад в теорию потенциала, его именем названа специальная функция – функция Ленжендра.

Листинг Иоганн Бенедикт (1808 – 1882) - немецкий математик и физик, известный своими работами в области топологии. Ему принадлежат идеи как самого термина топология, так геоида.

Ломоносов Михаил Васильевич (1711-1765) – выдающийся российский естествоиспытатель мирового значения, энциклопедист, химик и физик. Его работы о питании растений, о происхождении черноземов и др. имели большое значение для формирования научных взглядов на почву. Выдающееся значение имели также его геологические труды.

Машимов Мухамбет Машимович (1930 - 2001) - выдающийся учёный-геодезист, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации. автор фундаментальных трудов: «Уравнивание геодезических сетей» и «Планетарные теории геодезии».

Молоденский Михаил Сергеевич (1909 - 1991) - российский геофизик, геодезист и астроном, член-корреспондент АН СССР. Разработал теорию определения фигуры и гравитационного поля Земли, предложил отсчитывать высоты точек от квазигеоида.

Мопертюи Пьер Луи де (1698 - 1759) - французский астроном и геодезист, последователь и распространитель идей И. Ньютона, руководитель Лапландской экспедиции по изучению формы и размеров Земли (1736 - 1737).

Мохоровичич Андрей (1857-1936) - югославский геофизик и сейсмолог, установил наличие границы раздела между земной корой и мантией Земли (1909), названной поверхностью его именем.

Ньютон Исаак (1643 - 1727) - английский физик, астроном, математик, член Лондонского королевского общества и его президент. Автор гениальнейшего произведения «Математические начала натуральной философии». В нем изложена теория всемирного тяготения, обоснованы законы движения небесных тел (законы Кеплера), математически доказано, что Земля, по своей форме, представляет сплюснутый сфероид.

Смит Уильям (1769-1839) - английский геодезист и геолог, основоположник исторической геологии и стратиграфии.

Стокс Джон Габриель (1819 – 1903) – английский математик, механик и физик, впервые доказавший в 1849 г., что определение фигуры Земли принципиально возможно без знания закона изменения плотности внутри Земли.

Струве Василий Яковлевич (Фредерик-Георг-Вильгельм) (1793 - 1864) - выдающийся астроном, директор Пулковской обсерватории, профессор Дерптского университета. С целью уточнения формы и размеров Земли, по его инициативе и под его руководством, выполнены градусные измерения по «дуге Струве».

Теннер Карл Иванович (1783 - 1860) - российский геодезист, участник и с 1815 года - руководитель геодезических работ в южной части «дуги Струве», руководил производством топографических съёмки в западных районах Российской империи.

Тодхантер Исаак (1820 - 1884) - английский математик и историк науки, автор монографии «История математических теорий притяжения и фигуры Земли от Ньютона до Лапласа».

Шуберт Фёдор Фёдорович (1789 - 1865) - российский астроном-геодезист, автор каталога геодезических пунктов (их число в каталоге превышает 14 тысяч), начальник Корпуса военных топографов России, организатор системы подготовки топографов.

Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Блинов А. Ф. Высшая геодезия : учебное пособие / А. Ф. Блинов, Е. П. Тарелкин, Н. Е. Трачук. – Санкт-Петербург : НОИР. – 2015. – 268 с.
2. Красовский Ф. Н. Руководство по высшей геодезии. Ч.1 / Ф. Н. Красовский. – Москва : Книга по Требованию, 2013. – 479 с.

Дополнительная литература

1. Гаусс К. Ф. Избранные геодезические сочинения. Т.2. Высшая геодезия / К. Ф. Гаусс. – Москва : Книга по Требованию, 2013. – 252 с.
1. Закатов П. С. Курс высшей геодезии / П. С. Закатов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1976. – 511 с.
2. Малков А. Г. Высшая геодезия. Высокоточные измерения : учебно-методическое пособие / А. Г. Малков. – Новосибирск : СГГА, 2011. – 46 с.
3. Огородова Л. В. Высшая геодезия : учебник для вузов / Л. В. Огородова. – Москва : Геодезкартиздат, 2006. – 384 с.
4. Пеллинен Л. П. Высшая геодезия (Теоретическая геодезия) / Л. П. Пеллинен. – Москва : Недра, 1978. – 264 с.
5. Практикум по высшей геодезии (вычислительные работы) : учебное пособие для вузов / Н. В. Яковлев, Н. А. Беспалов, В. П. Глумов и др. – 2-е изд., стер. – Москва : Альянс, 2007. – 386 с.
6. Уралов С. С. Курс геодезической астрономии / С. С. Уралов. – Москва : Книга по Требованию, 2013. – 592 с.
7. Яковлев Н. В. Высшая геодезия : учебник для вузов / Н. В. Яковлев. – Москва : Недра, 1989. – 445 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное пособие
ISBN 978-5-906759-12-2

Тарелкин Е. П. Высшая геодезия : учебное пособие / Е. П. Тарелкин, Н. Е. Трачук. – Санкт-Петербург : НОИР г. Санкт-Петербург, 2015. – 134 с.

Ответственный за выпуск Грызлова А.В.
Редактор Федорова Т.Л.

Подписано в печать 24.10.2014
Заказ № 1124/14
Формат 60x84 1/16
Усл. печ.л. 4,9.
Тираж 300 экз.

Отпечатано в ООО «Информационно-консалтинговый центр»
по заказу НЧОУ ВПО
«Национальный открытый институт г.Санкт-Петербург»

197183 г. Санкт-Петербург, ул. Сестрорецкая дом 6
Тел. +7-812-430-07-16 доб. 224