

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

Е. Г. Гиенко

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебно-методического пособия для обучающихся
по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование
(уровень бакалавриата)

Новосибирск
СГУГиТ
2024

УДК 528.236(075.8)

Г465

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент, СГУГиТ *И. Е. Дорогова*

заместитель директора по производству/начальник производственного отдела ООО «ГЕОКАД плюс» *Д. А. Кауфман*

Гиенко, Е. Г.

Г465 Современные геодезические методы создания государственной координатной основы : учебно-методическое пособие / Е. Г. Гиенко. – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – 104 с. – Текст : непосредственный. ISBN 978-5-907711-53-2

Учебное пособие подготовлено кандидатом технических наук, доцентом Е. Г. Гиенко на кафедре космической и физической геодезии СГУГиТ.

Учебное пособие содержит основные теоретические сведения о государственной координатной основе и принципах ее создания классическими и современными методами, о современном состоянии и перспективах развития, контрольные вопросы, необходимую справочную информацию.

Издание по дисциплине «Современные геодезические методы создания государственной координатной основы» предназначено для обучающихся по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование (уровень бакалавриата).

Учебное пособие рекомендовано к изданию кафедрой космической и физической геодезии, Ученым советом Института геодезии и менеджмента СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 528.236(075.8)

ISBN 978-5-907711-53-2

© СГУГиТ, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Общие сведения о создании государственной координатной основы	8
1.1. Основные понятия и определения	8
1.2. Построение государственных геодезических сетей	12
1.2.1. Историческая справка	12
1.2.2. Основные принципы построения государственных геодезических сетей	13
2. Классические методы создания государственной геодезической сети	23
2.1. Триангуляция, полигонометрия и трилатерация	23
2.2. Космическая и доплеровская геодезические сети	28
2.3. Государственная геодезическая сеть по состоянию на 1995 год	29
2.4. Пункты государственной сети, созданной наземными методами, – геодезическое наследие	30
3. Современные методы создания государственной геодезической сети	34
3.1. Создание государственных геодезических сетей спутниковыми методами	34
3.2. Современная структура ГГС	38
3.3. Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть	40
3.4. Сгущение ФАГС: высокоточная геодезическая сеть и спутниковая геодезическая сеть 1-го класса	46
3.4.1. Высокоточная геодезическая сеть	46
3.4.2. Спутниковая геодезическая сеть 1-го класса	47
3.5. Дифференциальные геодезические станции	49
4. Государственная высотная и гравиметрическая основа	55
4.1. Государственная высотная основа	55
4.1.1. Системы высот	55
4.1.2. Государственная высотная основа России	59
4.1.3. Гравиметрическое обеспечение государства	62
4.2. Направления развития государственной высотной основы	64
4.2.1. Общие положения	64

4.2.2. Развитие метода спутникового нивелирования	65
4.2.3. Глобальные модели геоида	66
4.2.4. Мировая система высот.....	68
4.2.5. Хронометрическое нивелирование	69
4.2.6. Дальнейшее развитие высотно-гравиметрического обеспечения	70
5. Системы координат, применяемые в России. Принципы взаимного трансформирования геодезических систем координат.....	73
5.1. Государственные системы координат	73
5.1.1. Общие сведения	73
5.1.2. Референцные системы координат СК-42 и СК-95	74
5.1.3. Государственные геоцентрические системы координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11	75
5.1.4. Местные системы координат.....	77
5.2. Преобразование между различными системами координат.....	79
5.2.1. Преобразование между референчными и геоцентрическими системами координат	79
5.2.2. Уточнение преобразования координат на ограниченной территории.....	82
5.2.3. Переход к местным системам координат	83
5.3. Спутниковое нивелирование. Построение моделей локального квазигеоида.....	85
Заключение	89
Библиографический список.....	91
Приложение 1. Меню Федерального портала пространственных данных....	98
Приложение 2. Карта расположения геодезических пунктов (сайт GEOBRIDGE)	99
Приложение 3. Карта расположения постоянно действующих пунктов ФАГС на 18.10.2023 (сайт RGS-Center)	100
Приложение 4. Страница сайта RGS-Center для скачивания Rinex-файлов ГНСС-измерений на пунктах ФАГС	101
Приложение 5. Карта размещения станций геодезических сетей специального назначения, отчеты о создании которых помещены в Федеральный фонд пространственных данных	102
Приложение 6. Скриншот страницы Федеральной сети геодезических станций со сведениями о станциях и их операторах	103

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие предназначено для изучения и закрепления теоретического материала по дисциплине «Современные геодезические методы создания государственной координатной основы» для обучающихся по направлению подготовки 21.03.03 «Геодезия и дистанционное зондирование» (уровень бакалавриата, профиль «Геодезия»).

Теоретические вопросы, рассмотренные в пособии, соответствуют рабочей программе дисциплины и направлены на формирование соответствующих профессиональных компетенций в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование, профиль «Геодезия».

Цель дисциплины «Современные геодезические методы создания государственной координатной основы» состоит в получении обучающимися общего представления о современных геодезических методах создания и развития трех- и четырехмерной координатной основы на физической поверхности Земли для решения научных и практических задач геодезии.

Основными задачами дисциплины являются:

- закрепление знаний по основным принципам создания геодезической координатной основы на поверхности Земли, как с помощью традиционных (классических) средств измерений (триангуляция, трилатерация, полигонометрия, нивелирование, астрономические и гравиметрические определения), так и с помощью спутниковых средств измерений;
- формирование у обучающихся целостного представления о государственной геодезической сети (ГГС) и государственной нивелирной сети (ГНС) как о главной координатной (плановой и высотной) опоре страны, основе для выполнения всех видов инженерно-геодезических изысканий, топографических и картографических работ, создания любых видов пространственных данных.

К государственным геодезическим сетям предъявляются повышенные

требования к точности, однородности, долговременной стабильности, поскольку они задают опору для развития сетей сгущения, составления единой картографической основы, землеустроительных и кадастровых работ, определения государственных и административных границ.

С развитием спутниковых методов и технологий позиционирования в геодезии, геодинاميке и топографии существенно изменились роль и функциональные требования к государственной инфраструктуре геодезических измерений – государственным системам координат и геодезическим сетям. Федеральный закон «О геодезии, картографии и пространственных данных» [32] декларирует современную структуру государственной геодезической сети: фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС), высокоточная геодезическая сеть (ВГС), спутниковая геодезическая сеть 1-го класса СГС-1. Указанные сети заменяют существующую геодезическую сеть 1–4-го класса, созданную наземными геодезическими методами.

В настоящее время для решения множества прикладных задач, связанных с высокоточным координатным обеспечением с применением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), создаются и используются дифференциальные геодезические станции (ДГС). В России создана Федеральная сеть геодезических станций (ФСГС) – совокупность функционально объединенных дифференциальных геодезических станций с пунктами ФАГС, на которых выполняется прием сигналов со спутниковых навигационных систем и осуществляется передача измерительной информации в аппаратно-программный комплекс ФСГС, обеспечивающий ежедневное определение координат ДГС.

Таким образом, на государственном уровне формируется современная структура геодезических сетей, которая подробно описывается в учебном пособии. Современному выпускнику по направлению «Геодезия» необходимо знать о государственном координатном обеспечении как основе для выполнения геодезических работ.

Государственные геодезические сети ФАГС, ВГС и СГС-1 реализуют государственную систему координат ГСК-2011, установленную для использования при осуществлении геодезических и картографических работ, с 01.01.2021. Согласно Постановлению Правительства РФ № 1240 от 24.11.2016 [26], система геодезических координат СК-95, как и существовавшая ранее СК-42, применяются до 1 января 2021 г. в отношении материалов (документов),

созданных с их использованием. Множество геодезических работ выполняется в местных системах координат, и актуальной задачей геодезиста является грамотное использование алгоритмов и параметров перехода от одной системы координат к другой. В учебном пособии рассматриваются вопросы согласования государственных и местных систем координат.

В настоящее время происходит модернизация государственной высотной основы, где одним из направлений является развитие спутникового нивелирования (II-IV классов) с использованием гравиметрических данных (моделей гравитационного поля Земли) и ГНСС-измерений. В пособии приводится описание различных методов спутникового нивелирования, знание которых необходимо будущим специалистам в области геодезии.

Дисциплина «Современные геодезические методы создания государственной координатной основы» читается на четвертом курсе в восьмом, последнем семестре бакалавриата. Для ее освоения необходимы знания, навыки и умения, приобретенные при изучении дисциплины «Спутниковые системы и технологии позиционирования» в шестом семестре. Также необходимы навыки, полученные после прохождения летних учебной и производственной практик. В дисциплине в завершающем семестре обучения обобщаются знания, полученные при изучении дисциплин «Системы координат», «Высшая геодезия», «Геодезическая астрономия с элементами астрометрии», «Физическая геодезия». Комплекс знаний по данным дисциплинам рассматривается как фундамент для освоения данной дисциплины, посвященной построению государственной координатной основы – высшего уровня геодезической, нивелирной и гравиметрической сетей.

Курс включает обзор современного состояния геодезического обеспечения на государственном уровне, изучение актуальных нормативных документов и предусматривает закрепление знаний, полученных в предыдущих семестрах. Поэтому некоторые вопросы, термины, постоянные не поясняются в пособии и рассматриваются как уже известные.

Для успешного освоения теоретического материала необходимо отвечать на контрольные вопросы, прорабатывать нормативную документацию по теме курса, выполнять задания для самостоятельной работы, приведенные после разделов.

Автор желает обучающимся успехов в изучении дисциплины.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОЗДАНИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ

1.1. Основные понятия и определения

Система координат (СК, coordinate system) – математическое описание (набор правил), как координаты должны быть соотнесены с точками пространства. Основные параметры, задающие систему координат, – положение начала, ориентировка координатных осей и вид координат.

Координатная система отсчета (reference system) – система координат, связанная с Землей исходными геодезическими датами (например, земной эллипсоид, исходный геодезический пункт, гравитационное поле Земли (ГПЗ)). В настоящее время координатная система отсчета включает и систему измерения времени [43].

Теоретически система отсчета задается тремя составляющими:

- 1) концепция системы (назначение, положение начала, направление координатных осей, вид системы координат);
- 2) фундаментальная теория (ньютоновское приближение теории тяготения, общая теория относительности (ОТО) и др.);
- 3) стандарты: геодезические постоянные и единицы измерения (параметры эллипсоида (a , e), угловая скорость вращения Земли ω , гравитационный параметр Земли fM , система измерения времени (секунда земного времени Terrestrial Time (TT) и др.).

Теоретическое задание каждой системы отсчета приводится в соответствующих нормативных документах (например, описание ГСК-2011 и ПЗ-90 [26, 12, 36]) и на специализированных сайтах (например, International Terrestrial Reference System (ITRS) [56]).

Система отсчета реализуется через координатную основу – набор долговременно закрепленных пунктов с известными координатами (Reference Frame).

Итак, различают теоретическое задание системы отсчета (System,

например, ICRS, ITRS) и ее реализацию (координатную основу, Frame, ITRS, ITRF).

Реализации одной и той же теоретической системы могут быть разными на некотором уровне точности (это связано с разными носителями координат, разной измерительной аппаратурой, технологиями измерений и алгоритмами обработки и т. д.). Например, государственные геоцентрические системы координат России имеют две реализации и два назначения: ГСК-2011 предназначена для обеспечения геодезических и картографических работ, ПЗ-90.11 служит для координатного обеспечения системы ГЛОНАСС [26].

Современные высокоточные реализации геоцентрических систем координат спутниковыми методами – функции времени, главным образом, из-за глобального движения литосферных плит.

Государственную координатную основу определяет множество геодезических пунктов с известными точными координатами в единой, государственной системе координат. Система геодезического обеспечения Российской Федерации есть генеральная совокупность фундаментальных параметров фигуры Земли и внешнего гравитационного поля Земли, реализуемых на территории Российской Федерации через государственную координатную основу и структуру государственных сетей [43].

В федеральном законе (ФЗ) [32] приводятся следующие определения и назначение различных государственных геодезических сетей:

«...Для обеспечения выполнения геодезических и картографических работ на территории Российской Федерации создаются и используются государственная геодезическая сеть, государственная нивелирная сеть и государственная гравиметрическая сеть.

– Государственная геодезическая сеть ГГС – совокупность геодезических пунктов, используемых в целях установления и (или) распространения предусмотренных настоящим Федеральным законом систем координат;

– Государственная нивелирная сеть ГНС – совокупность нивелирных пунктов, используемых в целях установления или распространения государственной системы высот;

– Государственная гравиметрическая сеть ГГрС – совокупность гравиметрических пунктов, имеющих значения, определенные в результате гравиметрических измерений;

– Сети специального назначения ГССН (в том числе сети дифференциальных геодезических станций) – для обеспечения выполнения геодезических работ при осуществлении градостроительной и кадастровой деятельности, землеустройства, недропользования, иной деятельности, а также повышения точности результатов...»

Основными характеристиками ГГС, ГНС, ГГрС, ГССН являются назначение, требуемая точность и плотность (расстояния между пунктами).

Государственная координатная основа (ГКО) включает в себя совокупность закрепленных на местности геодезических, нивелирных или гравиметрических пунктов, то есть объединяет перечисленные выше сети (рис. 1).

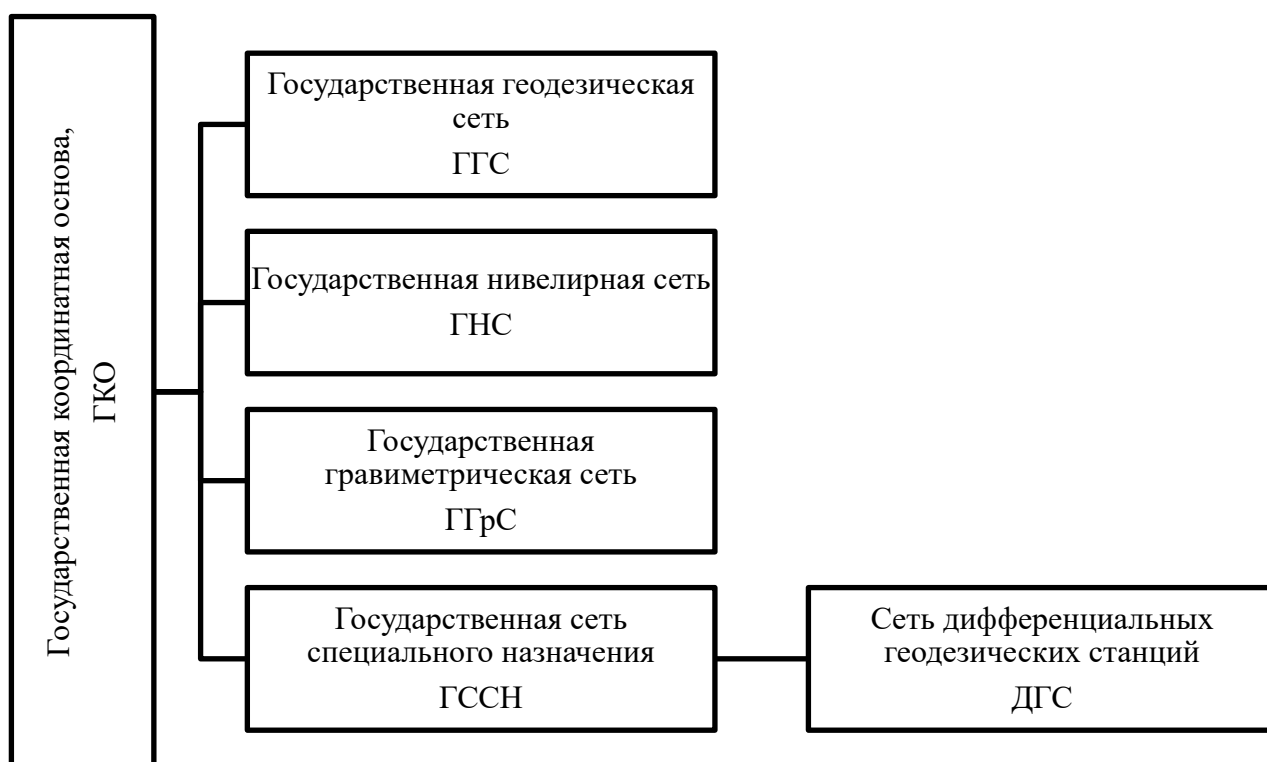


Рис. 1. Структура государственной координатной основы

Перечисленные геодезические сети являются опорными для создания и развития геодезических сетей сгущения (ГСС).

Принадлежность сетей. Согласно ФЗ «О геодезии,...» [32], государственные сети (ГКО) находятся в ведомстве федеральных органов исполнительной власти. Сведения о координатах и пунктах, за исключением

сведений, относящихся к государственной тайне, предоставляются потребителям на безвозмездной основе.

Геодезические сети сгущения могут быть в ведомстве федеральных органов исполнительной власти, органов государственной власти субъектов РФ, органов местного самоуправления, физических и юридических лиц в соответствии с установленными требованиями. Доступ к сведениям о координатах и пунктах геодезических сетей сгущений оговаривается отдельно.

За создание и развитие государственной координатной основы отвечает федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» (ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», ЦГКиИПД), www.cgkipd.ru.

Вопросы и задания

1. Используя нормативные документы, данные сайтов IERS и ITRF, привести описание систем отсчета: ITRS, ICRS, ПЗ-90 и ГСК-211 (назначение системы, положение начала, теория, стандарты).

2. Чем принципиально отличается координатная основа ITRF от ГСК-2011? Для ответа на вопрос повторить материалы дисциплин «Системы координат», «Применение ГНСС в геодезии и навигации».

3. По каким признакам отличаются ГСК-2011 и ПЗ-90.11?

4. Общеземные и референчные системы координат. Дать определение и привести примеры.

5. Классификация систем координат в геодезии. Привести примеры. Для ответа на вопрос повторить материалы дисциплин «Космическая геодезия», «Системы координат».

6. Расшифровать аббревиатуры и сформулировать назначение ГГС, ГНС, ГГрС, ГССН, ДГС.

7. Выписать из ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных» номера статей, где говорится о государственной координатной основе.

8. Ознакомиться со структурой сайта «Центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных».

1.2. Построение государственных геодезических сетей

1.2.1. Историческая справка

Главной особенностью России, определяющей стратегию создания и развития государственной геодезической сети, является ее большая территория (СССР – 1/6 часть суши, Россия – около 1/7 части). С одной стороны, градусные измерения на такой территории позволили более точно установить параметры эллипсоида, с другой стороны, процесс проведения работ неизбежно приводил к распространению и накоплению ошибок. Требовалось разработать особые программы построения и уравнивания государственных геодезических сетей, отличные от программ, разработанных в других странах.

Кроме того, огромные территории на востоке и севере страны были труднодоступны и малозаселены, со сложными климатическими условиями. Эти факторы определяли особые требования к организации работ, к приборному и материальному обеспечению.

15 марта 1919 г. был подписан Декрет о Высшем геодезическом управлении. В Декрете об учреждении Высшего геодезического управления (ВГУ) нашли свое отражение идеи Феодосия Николаевича Красовского [18]. В том числе, относительно государственной координатной основы отмечалось, что необходимо «...изучение распределения силы тяжести и исполнение градусных измерений, составление главной триангуляции страны и производство точных нивелировок, создание общей нивелирной сети, необходимой для обоснования общей топографической съемки...»

Возглавив Государственный институт геодезии и картографии (ГИГК, далее – ЦНИИГАиК) в 1928 г., Ф. Н. Красовский поставил перед ним основные задачи, это:

- вывод исходных геодезических дат и установление наилучшего подходящего эллипсоида;
- исследования по изучению фигуры геоида и по выводам общего земного эллипсоида;
- установление методов уравнивания и вычисления триангуляции первого класса СССР;

– исследования по методам астрономических работ в государственной триангуляции, по измерениям базисов, по высокоточным измерениям углов в триангуляции первого класса, систематических погрешностей в нивелировании высокой точности;

– рассмотрение вопроса о конструкции рядов триангуляции первого класса и исследования по замене триангуляционного способа получения опорных точек иными построениями и по физическим методам определения расстояний; вопрос о введении в СССР системы координат Гаусса – Крюгера; участие в общей гравиметрической съемке СССР и в научном использовании ее результатов;

– исследования по конструкции геодезических и гравиметрических инструментов, проектирование новых конструкций и участие в изготовлении советскими заводами этих приборов.

Решение задач, поставленных Ф. Н. Красовским, определило развитие отечественной геодезии на длительную перспективу. В регионах страны создавались аэрогеодезические предприятия, где важнейшей задачей была реализация единой государственной координатной основы.

Исторические сведения о становлении государственных геодезических сетей можно найти на сайте Центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных, в разделе, посвященном 100-летию образования Высшего геодезического управления [18].

1.2.2. Основные принципы построения государственных геодезических сетей

Принципы создания государственных геодезических сетей подробно рассматривались ранее в других дисциплинах образовательной программы (высшая геодезия – [2, 44], геодезическая астрономия с элементами астрометрии), поэтому ниже будет дан только общий список с небольшими комментариями, касающимися построения геодезических сетей классическими наземными методами и спутниковыми методами.

1. Переход от общего к частному. Классический принцип, задающий иерархию передачи координат в геодезических сетях в несколько этапов.

Сначала создаются опорные геодезические сети самого высокого (первого) класса, состоящие из крупных геодезических построений. Координаты пунктов этих сетей определяются с наилучшей точностью. Затем относительно пунктов опорных сетей определяются координаты пунктов более низкого класса, с меньшими расстояниями между пунктами и т. д., пока не будет достигнута требуемая плотность расположения пунктов. Примеры иерархии: астрономо-геодезическая сеть 1–3-го классов (создание классическими наземными методами); ФАГС-ВГС-СГС-1 (создание спутниковыми методами).

2. Всевозможный контроль измерений и вычислений. Особенно важен для создания и развития ГГС на больших территориях. Контроль реализуется главным образом:

- через наличие избыточных измерений и уравнивание сети;
- обеспечение жесткости сети (соблюдение оптимальной геометрии сети);
- внешние контроли ориентировки и масштаба сети, координат пунктов.

Переход от общего к частному и контроль измерений и вычислений необходимы для предотвращения накопления систематических ошибок, а также выявления и отбраковки грубых измерений. Во избежание накопления ошибок исходных данных число классов сетей не должно быть большим.

3. Разделение государственной координатной основы по виду сетей. Классические (наземные) методы создания ГКО. При создании ГКО наземными методами неизбежно разделение геодезических сетей на плановую и высотную части.

Плановая часть, астрономо-геодезическая сеть (АГС) создавалась методами триангуляции, полигонометрии и трилатерации, в результате определялись геодезические широта и долгота пунктов сети.

Высотная часть, государственная нивелирная сеть (ГНС) создавалась методом геометрического нивелирования, в результате определялись нормальные высоты пунктов.

Геодезические высоты пунктов АГС над эллипсоидом Красовского

вычислялись по результатам нивелирования с привлечением данных астрономо-гравиметрического или гравиметрического нивелирования.

Определение геодезических высот тригонометрическим нивелированием (измерение вертикальных углов на пунктах триангуляции и полигонометрии) сопровождается большими ошибками из-за влияния вертикальной рефракции у горизонта, поэтому данный метод не использовался при построении сетей.

Последствия разделения на плановую и высотную части ГКО, создаваемой наземными методами:

- размещение пунктов высокочасных АГС и ГНС в разных точках, пункты триангуляции – на командных высотах, пункты нивелирования – вдоль трасс (авто- или железных дорог);

- в большинстве случаев плановые и высотные координаты одного и того же геодезического пункта относятся к разным классам точности;

- каталоги плановых и высотных координат, как правило, разделены по видам работ и, например, каталоги нормальных высот пунктов могут содержать лишь примерные плановые координаты.

В результате государственная координатная основа, созданная наземными методами, не является однородной по точности.

3. Разделение государственной координатной основы по виду сетей. Современные (спутниковые) методы создания ГКО. Современная государственная координатная основа также разделена, но по другим признакам. Составляющие современной ГКО:

- «геометрическая» часть (спутниковые геодезические сети, где пространственное положение пунктов (3D) определяется в геоцентрической системе отсчета по измерению псевдодальностей до спутников ГНСС примерно с одинаковой точностью в плане и по высоте);

- «физическая» часть (нивелирная сеть, гравиметрическая сеть, где характеристики пунктов (нормальные высоты и ускорения силы тяжести) определяются в гравитационном поле Земли.

Рис. 2 иллюстрирует разделение государственной координатной основы по виду сетей, в зависимости от метода ее создания.



Рис. 2. Разделение государственной координатной основы по виду сетей

4. *Обоснование требуемой точности.* Требуемая точность положения пунктов – одна из важных характеристик геодезической сети. Именно это требование обуславливает разработку приборного обеспечения, методов и технологий измерений и обработки, соответствующего теоретического обоснования.

В 40-е гг. XX в. перед геодезистами была поставлена задача обеспечения всей территории страны картами масштаба 1 : 100 000. Таким образом, если принять точность определения координат 0,1 мм в масштабе карты, то это составит величину 10 м – такова была требуемая точность определения абсолютных координат пунктов. Под абсолютными координатами подразумевается положение относительно центра референц-эллипсоида. Например, астрономические определения широт пунктов Лапласа 1-го класса выполнялись со средней квадратической погрешностью не более 0,3", что соответствует величине примерно 10 м.

Если 10 м разделить на радиус Земли, то получим относительную ошибку порядка 10^{-6} . Взаимное положение пунктов на поверхности Земли должно было также удовлетворять относительной ошибке 10^{-6} . Именно эти требования были в основе построения АГС наземными методами.

Что касается спутниковых методов построения геодезических сетей, то здесь точность определения положений пунктов регламентируется аппаратной точностью современной ГНСС-аппаратуры и находится на субсантиметровом уровне. Повышение точности координатных определений

спутниковыми методами по сравнению с наземными методами позволило определять изменения координат во времени и выполнять геодинамические исследования, производить мониторинг зданий и сооружений в реальном времени, выполнять точную навигацию и т. д.

5. *Принцип выбора параметров референц-эллипсоида.* Размер и форму референц-эллипсоида задают два параметра: (a, b) , или (a, e) , или (a, f) , где a, b – большая и малая полуоси эллипсоида, e, f – его эксцентриситет и сжатие соответственно.

На рис. 3 показаны основные отсчетные поверхности – физическая поверхность Земли, эллипсоид и геоид. Расстояние между эллипсоидом и геоидом называется аномалией высоты ζ , что в геометрическом представлении есть разность геодезической и нормальной высоты (высота квазигеоида над эллипсоидом)

$$\zeta^{\gamma} = H - H^{\gamma},$$

или разность геодезической и ортометрической высоты (высота геоида над эллипсоидом)

$$\zeta^g = H - H^g.$$

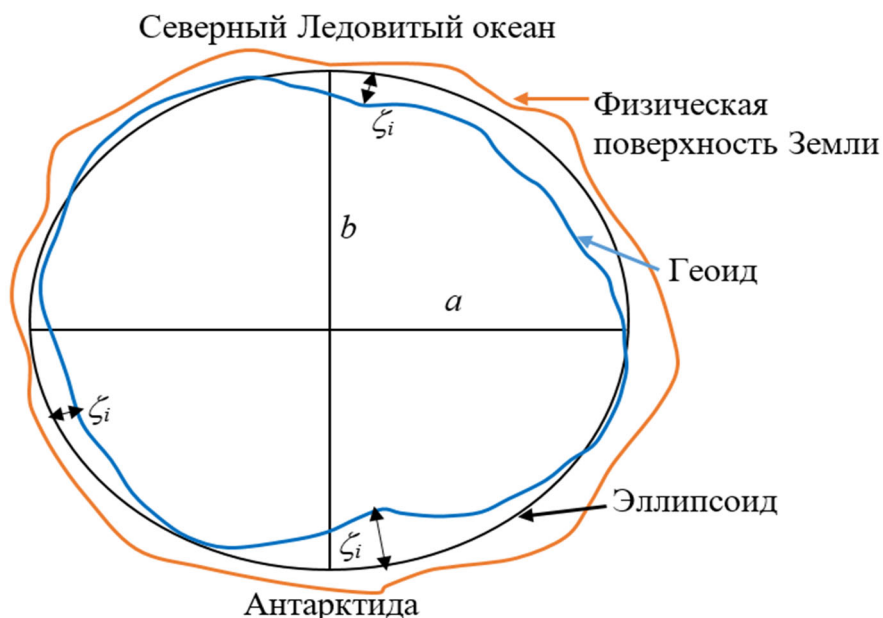


Рис. 3. Основные отсчетные поверхности: эллипсоид, геоид, физическая поверхность Земли

Размер и форма эллипсоида задаются таким образом, чтобы соблюдалось условие минимума суммы квадратов аномалий высоты ζ_i

$$\sum \zeta_i^2 = \min.$$

Если этот минимум соблюдается по всему земному шару, а начало совпадает с центром масс Земли, то эллипсоид называется общеземным; если условие верно для определенного государства, то референчным.

Параметры референц-эллипсоидов традиционно устанавливались по результатам геодезических градусных измерений – длины дуги на земной поверхности и ее угловой величины. Параметры общеземных эллипсоидов определялись по результатам наблюдений искусственных спутников Земли.

В России государственные системы координат СК-42 и СК-95 относятся к референц-эллипсоиду Красовского. Смещение начала референц-эллипсоида относительно центра масс Земли и его ориентировки относительно оси вращения Земли и начального меридиана вызваны ошибками реализации системы координат СК-42 наземными методами.

Современные государственные системы координат России ГСК-2011 и ПЗ-90 основываются на общеземных эллипсоидах ГСК-2011 и ПЗ-90 соответственно.

Параметры нескольких земных эллипсоидов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры земных эллипсоидов

Эллипсоид	Большая полуось a , м	Малая полуось, b , м
Бесселя	6 377 397	6 356 079
Красовского	6 378 245	6 356 863
ПЗ-90	6 378 136	6 356 751,362
ГСК-2011	6 378 136,5	6 356 751,758
WGS-84	6 378 137	6 356 752,314
GRS80	6 378 137	6 356 752,3141

6. *Исходные геодезические даты (ИГД, DATUM)*. Это набор параметров, описывающих связь координатной системы с Землей и определяющих положение начала, масштаб и ориентировку осей системы координат по отношению к Земле.

В классических наземных методах создания ГКО исходными геодезическими датами являются:

- геодезические координаты – широта B_0 и долгота L_0 одного из опорных пунктов сети, принятого за исходный;
- геодезический азимут A_0 направления с исходного пункта на один из смежных пунктов сети;
- высота эллипсоида ζ_0 в исходном пункте над геоидом.

ИГД устанавливаются после вывода референц-эллипсоида путем определения астрономических координат исходного пункта и астрономического азимута направления и освобождения их от влияния уклонений отвеса.

Исходным пунктом геодезической сети СССР служит центр бывшего Круглого зала Пулковской астрономической обсерватории, для которого приняты следующие геодезические координаты: широта $B_0 = 59^\circ 46' 18,55''$, долгота $L_0 = 30^\circ 19' 42,09''$, высота ζ_0 положена равной нулю.

Вывод указанных ИГД СССР выполнили А. А. Изотов и М. С. Молоденский в 1942 г. Эти ИГД, как и эллипсоид Красовского, приняты за основу единой государственной системы координат при производстве всех геодезических и картографических работ на территории СССР.

Геодезические координаты всех остальных пунктов сети и азимуты получают путем вычислений на основании результатов геодезических измерений, приведенных к поверхности референц-эллипсоида. Геодезические координаты пунктов астрономо-геодезической сети СССР и некоторых других стран вычисляются на поверхности эллипсоида Красовского.

С развитием методов космической геодезии появилась возможность на основе наблюдений искусственных спутников Земли получать параметры общеземного эллипсоида, представляющего Землю в целом, и развивать единую мировую геодезическую систему координат. Координаты исходного пункта геодезической сети, азимут направления с исходного пункта на смежный, высота квазигеоида над эллипсоидом в исходном пункте

утратили свою актуальность как составляющие ИГД.

В современном понимании ИГД (DATUM) включают параметры обще-земного эллипсоида, модель гравитационного поля Земли, стандарты (гео-центрическая гравитационная постоянная, скорость света и др.). Описание систем координат обязательно включает перечисленные параметры, например, описание ПЗ-90.11 [36].

7. Перенос измерений с поверхности Земли на референц-эллипсоид. Здесь существуют два основных метода: проектирования и развертывания.

Метод развертывания заключается в переносе измерений на эллипсоид по нормальным высотам, без учета уклонов отвесной линии и аномалий высоты, и подходит с ограничениями для небольших территорий.

Ф. И. Красовский определил, что для большой территории страны наиболее подходящий метод создания карт – метод проектирования, когда точки с физической поверхности Земли проектируются на РЭ по нормали к нему. В измерения вводятся поправки за проектирование на поверхность эллипсоида (за уклонение отвесной линии и аномалию высоты, см. разд. «Редукционная проблема в геодезии», дисциплина «Высшая геодезия», [44, 37]).

8. Выбор картографической проекции. В СССР и далее в России принята проекция Гаусса – Крюгера – вариант универсальной цилиндрической проекции Меркатора (UTM). Здесь земной эллипсоид разделен по меридианам на 6- или 3-градусные зоны (рис. 4). Параметры проекции:

- масштаб вдоль осевого меридиана – 1;
- ось абсцисс x направлена север, $x_0 = 0$ на экваторе;
- ось ординат y направлена на восток, на осевом меридиане $y_0 = 500$ км для исключения отрицательных значений ординат.

Картопечатные станки проектировались и производились таким образом, что область в 6° помещалась на 1 лист карты масштаба 1 : 1 000 000. Вдоль осевого меридиана искажения отсутствуют, а на краю 6-градусной зоны – в пределах допустимых значений, несколько сантиметров.

Таким образом, в подразд. 1.2 перечислены основные принципы создания государственной координатной основы – переход от общего к частному, деление геодезических сетей, обязательный контроль полевых измерений и камеральных вычислений. Отмечается, что требуемая точность

координат пунктов сети определяет требования к измерительной аппаратуре, технологии измерений и обработке, к используемым теории и алгоритмам. Рассмотрены принципы выбора параметров земного эллипсоида и определения исходных геодезических дат. Обоснован метод переноса геодезических измерений с поверхности Земли на эллипсоид, приведены параметры проекции Гаусса – Крюгера, используемой в России для создания карт.

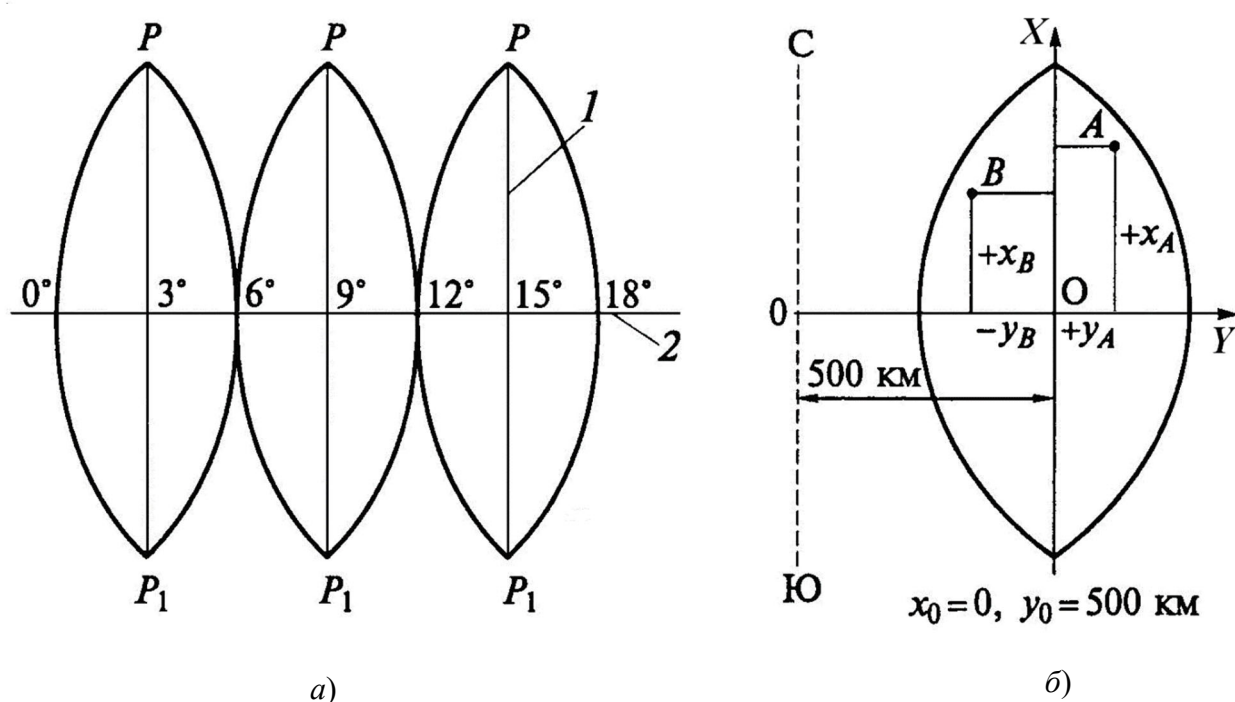


Рис. 4. Проекция Гаусса – Крюгера:

а) шестиградусные зоны: 1 – осевой меридиан, 2 – экватор; б) параметры проекции Гаусса – Крюгера

Приведенную обобщенную информацию обязаны знать выпускники вуза по профилю «Геодезия».

Вопросы и задания

1. Перечислить принципы создания ГКО.
2. В чем схожи и чем различаются принципы создания ГКО наземными

и спутниковыми методами?

3. Суть перехода от общего к частному при создании ГКО. Привести примеры.

4. Какие контроли предусматриваются при создании ГКО?

5. По какой причине не удалось создание равноточной трехмерной ГКО наземными методами?

6. Следствие разделения ГКО, созданной наземными методами, на плановую и высотную части.

7. По каким признакам разделяется ГКО, создаваемая современными методами?

8. Сравнить несколько референц-эллипсоидов между собой. Чем обусловлено различие? Какой эллипсоид наиболее подходящий для определенной территории?

9. Плюсы и минусы вывода параметров эллипсоида на территории СССР.

10. Какую проекцию можно предложить для картографирования протяженных газопроводов, ориентированных в направлении запад – восток?

2. КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ

2.1. Триангуляция, полигонометрия и трилатерация

Государственная геодезическая сеть создавалась в основном методами триангуляции, полигонометрии и реже – трилатерации. Как известно из предыдущих курсов, триангуляция состоит из измерений всех углов в треугольниках, базисных сторон и азимутов Лапласа на концах ряда, в полигонометрии измеряются углы и длины линий, а в трилатерации измеряются все стороны в треугольниках. Государственная геодезическая сеть строилась полигонами со сторонами не более 200 км, располагаемыми по возможности вдоль меридианов и параллелей [52].

Координаты пунктов ГГС передавались перечисленными методами от начального пункта с координатами (B_0, L_0) , расположенного в центре круглого зала Пулковской обсерватории (см. «Исходные геодезические даты», подразд. 1.2.2).

Схема развития ГГС 1-го, 2-го, 3-го класса *методом триангуляции* показана на рис. 5. Как видно на рисунке, здесь реализованы рассмотренные в подразд. 1.2 принципы построения государственной геодезической сети: 1) переход от общего к частному (ряды триангуляции 1-го класса, образующие замкнутые полигоны, и дальнейшее сгущение сетями 2-го и 3-го класса); 2) всевозможный контроль с целью выявления и исключения систематических ошибок и отбраковки грубых измерений. Внутренний контроль заключается в определении невязок в треугольниках и в замкнутых полигонах, а внешний контроль – путем измерения базисных сторон (контроль масштаба) и астрономических определений (измерение азимутов Лапласа, контроль ориентирования сети).

Контроль ориентирования сети триангуляции. Для контроля ориентирования ГГС в углах полигонов триангуляции 1-го класса определялись пункты Лапласа, парами через 200–250 км. Пункт Лапласа – геодезический

пункт, где измерены астрономические широта ϕ , долгота λ и азимут a^* направления на парный пункт Лапласа ([37], см. дисциплину «Геодезическая астрономия с элементами астрометрии»). Допустимые средние квадратические погрешности определений астрономических координат 1-го класса: широты $0,2''$, долготы $0,45''$ и азимута $0,5''$.

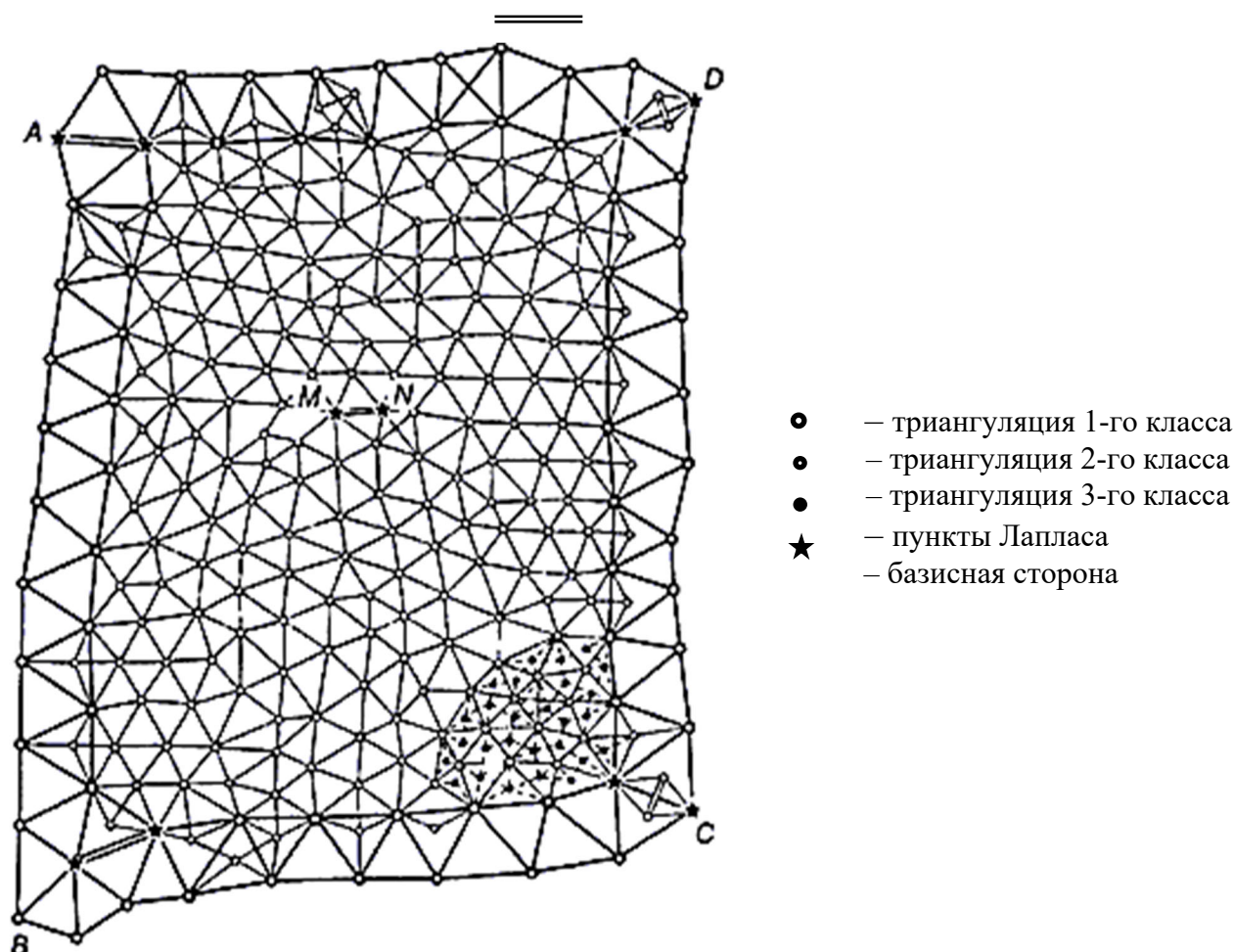


Рис. 5. Схема развития ГГС 1,2,3 классов методом триангуляции

С известными из вычислений триангуляции геодезическими координатами (B, L) пунктов Лапласа можно было получить астрономо-геодезические отклонения отвесной линии, $\xi = \phi - B$ – в плоскости меридиана и $\eta = (\lambda - L) \cos B \cos B$ – в плоскости первого вертикала.

По результатам астрономических и геодезических измерений вычислялся геодезический азимут Лапласа:

$$A = a^* - (\lambda - L) \sin \varphi + (\xi \cos a^* - \eta \sin a^*) / \tan Z = a^* - (\lambda - L) \sin \varphi + \gamma,$$

где Z – зенитное расстояние наблюдаемого пункта; $\gamma = (\xi \cos a^* - \eta \sin a^*) / \tan Z$ – поправка за уклонение отвесной линии, в большинстве случаев близка к нулю.

Назначение геодезических азимутов Лапласа: контроль ориентирования рядов триангуляции, исключение систематических ошибок.

Контроль масштаба сети триангуляции. Базисные стороны. Контроль масштаба сети осуществлялся с помощью линейных измерений. Базисы – измеренные расстояния в рядах триангуляции (как правило, между пунктами Лапласа) длиной 6–15 км измерялись с относительными ошибками не более 1 : 200 000. Измерения выполнялись сначала инварными проволоками, затем радио- и светодальномерами. Назначение: контроль масштаба сети.

Основные характеристики сети триангуляции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики триангуляции 1-го, 2-го и 3-го классов

Класс триангуляции	Длины сторон, км	Допустимая средняя квадратическая погрешность измерения углов, "	Допустимая невязка в треугольниках, "	Допустимая относительная погрешность базисной (выходной) стороны
1	20–25	0,7	3,0	1 : 400 000
2	7–20	1,0	4,0	1 : 300 000
3	5–8	1,5	6,0	1 : 200 000

Развитие ГГС *методами полигонометрии* происходило вдоль авто- и железнодорожных магистралей, в ряде случаев полигонометрия сопровождала линии высококлассного нивелирования. Схема развития ГГС методом полигонометрии показана на рис. 6, а основные характеристики приведены в табл. 3. При выполнении полигонометрии выполнялись контроли углов и координат.

С появлением в геодезическом производстве свето- и радио-

дальномеров стал использоваться метод трилатерации при определении координат пунктов ГГС. Данный метод из-за его меньшей строгости (по сравнению с триангуляцией) применялся только при развитии сетей сгущения, ГГС 3–4-го класса. Здесь схема сети (размеры сторон, допустимые минимальные размеры углов в треугольнике) такая же, как и для соответствующего класса триангуляции. Точность измерения сторон в трилатерации 3–4-го класса аналогична таким же величинам в полигонометрии. Схема сети трилатерации показана на рис. 7, а ее основные характеристики приведены в табл. 4.

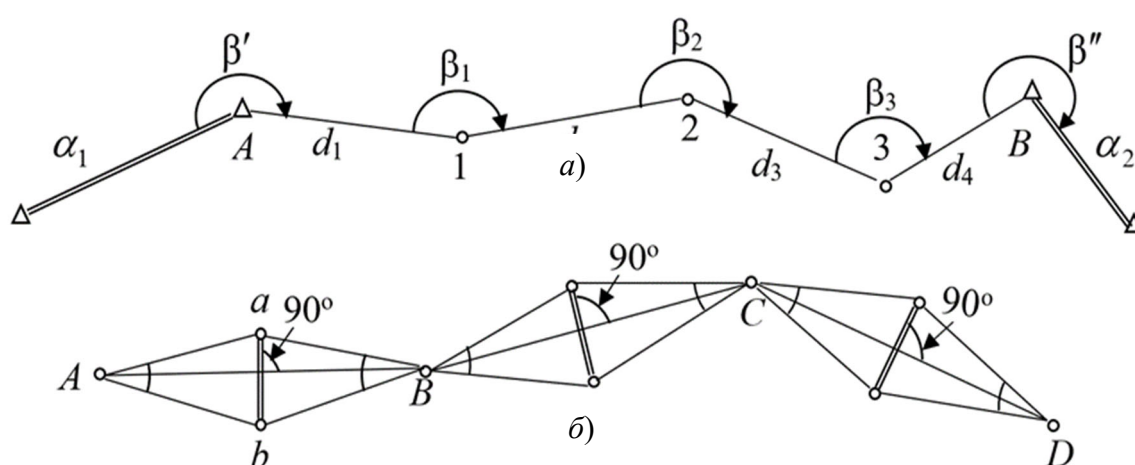


Рис. 6. Схема хода полигонометрии:

а) траверсная (магистральная); б) параллактическая (базисная)

Таблица 3

Характеристики ходов полигонометрии при развитии ГГС 1–4-го классов

Класс сети	Длины стороны хода, км	Допустимая средняя квадратическая погрешность измерения углов, "	Допустимая относительная погрешность стороны хода
1	8–30	0,4	1 : 400 000
2	5–18	1,0	1 : 200 000
3	3–10	1,5	1 : 100 000
4	$\geq 0,25$	2,0	1 : 40 000

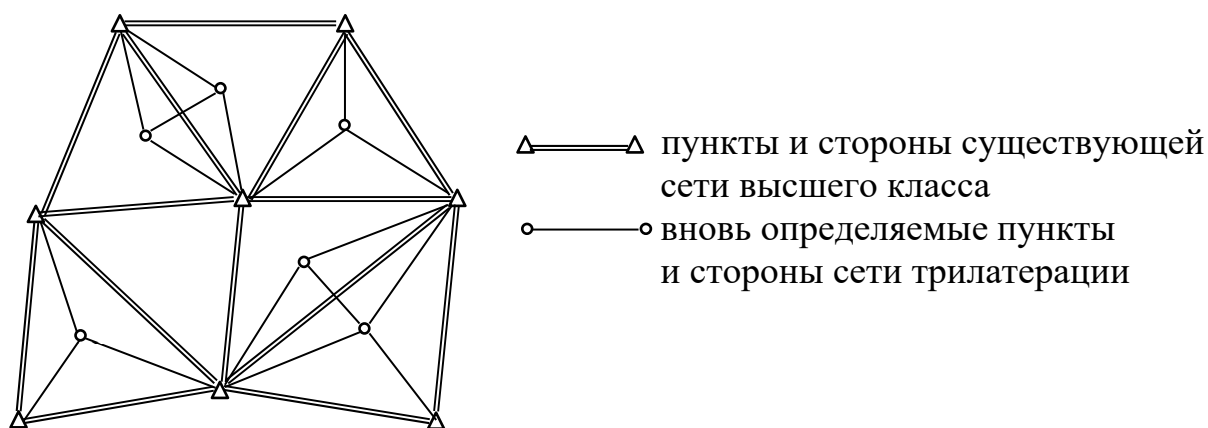


Рис. 7. Схема сети трилатерации

Таблица 4

Основные характеристики трилатерации

Класс сети	Длины стороны хода, км	Наименьшее значение угла в треугольнике, °	Допустимая относительная погрешность стороны хода
3	5–8	20	1 : 100 000
4	2–5	20	1 : 40 000

В итоге многолетних трудов геодезистов (проектирование, реконгосцировка, строительство и закладка пунктов, полевые измерения, полевой контроль, камеральная обработка и уравнивание), в сложных географических и климатических условиях, была создана государственная геодезическая сеть 1–4-го класса, где только в астрономо-геодезической сети (АГС) 1-го и 2-го класса насчитывалось 164 306 пунктов. АГС стала реализацией государственной системы координат СК-42.

Дальнейшее улучшение координатной основы произошло с привлечением методов космической геодезии и включением пунктов доплеровской и космической геодезической сетей в общее уравнивание.

Вопросы и задания

1. Какие принципы положены в основу создания ГГС методом триангуляции, полигонометрии, трилатерации? Привести примеры.
2. Назовите внутренние и внешние контроли в триангуляции.

3. Для чего нужны астрономические определения широты и долготы на пунктах триангуляции?
4. Назовите основные на ваш взгляд проблемы создания ГГС на территорию России.
5. Дать описание системы координат СК-42.

2.2. Космическая и доплеровская геодезические сети

Космическая геодезическая сеть (КГС) была создана по результатам наблюдения комплексной измерительной системы – спутника Гео-ИК (дальномерные, доплеровские, радиотехнические и фотографические наблюдения) – к 1990 г.

Назначение КГС – реализация отечественной геоцентрической системы координат ПЗ-90 для функционирования отечественной навигационной системы ГЛОНАСС (под управлением Министерства обороны РФ).

Сеть состоит из 26 пунктов с расстояниями от 1–1,5 тыс. км и средней квадратической погрешностью положения 0,2–0,3 м. Пункты КГС – станции наблюдений спутников ГЛОНАСС [34].

В настоящее время на орбитах действуют два спутника второго поколения Гео-ИК-2, запущенные в 2016 и 2019 гг., оснащенные новыми системами и доплеровскими радарами. Эти спутники предназначены для информационного сопровождения системы ГЛОНАСС, для уточнения параметров гравитационного поля Земли и решения других задач военного назначения.

Доплеровская геодезическая сеть (ДГС) была создана по доплеровским наблюдениям искусственного спутника Земли TRANZIT (американской спутниковой навигационной системы первого поколения). Наблюдения выполнялись специалистами Государственного управления геодезии и картографии СССР (ГУГК СССР). По результатам наблюдений были определены координаты 131 пункта с расстояниями 500–700 км и среднеквадратическая погрешность (СКП) 0,4–0,6 м [34].

Пункты ДГС и КГС вошли в общее уравнивание ГГС, что позволило существенно уточнить координатную основу СК-42 и реализовать систему координат 1995 г. – СК-95, принятую в качестве государственной до 2021 г.

Вопросы и задания

1. В сети Интернет найти информацию о спутнике ГЕО-ИК – назначение, оборудование, методы измерений, параметры орбиты и др.
2. В сети Интернет найти информацию о доплеровских системах TRANZIT и «Цикада». Почему отечественная система «Цикада» не использовалась для создания космической геодезической сети?
3. Чем реализации геоцентрической системы координат ПЗ-90 отличаются друг от друга? (ПЗ-90, ПЗ-90.02, ПЗ-90.11)?
4. За счет чего произошло уточнение координатной основы и выведена основа СК-95?

2.3. Государственная геодезическая сеть по состоянию на 1995 год

В 1991 г. было завершено уравнивание астрономо-геодезической сети СССР, созданной в основном классическими методами триангуляции с привлечением методов космической геодезии. Согласно Основным положениям о государственной геодезической сети [34], государственная геодезическая сеть включала в себя АГС, ДГС, КГС, ГСС.

Основные характеристики АГС 1–2-го класса (ряды триангуляции 1–2-го класса, сети триангуляции и полигонометрии, всего 164 306 пунктов.

1. Средние квадратические погрешности из уравнивания:

- углы: 0,74" (1-й класс), 1,06" (2-й класс);
- астрономические широты на пунктах Лапласа: 0,36";
- астрономические долготы на пунктах Лапласа: 0,043";
- азимуты: 1,27";
- базисы: 1 : 500 000.

2. Точность взаимного планового положения пунктов:

- 0,02...0,04 м для смежных пунктов;
- 0,25...0,8 м при расстояниях от 500 до 9 000 км.

Таким образом, на основании уточнения, переуравнивания пунктов ГГС была реализована государственная система координат СК-95, основными параметрами которой являются:

- поверхность относимости – референц-эллипсоид Красовского;
- начальный пункт – Пулково, центр Круглого зала;
- картографическая проекция Гаусса – Крюгера.

Основным достоинством геодезической сети, созданной наземными методами, является большое множество долговременно закрепленных пунктов на обширной территории с согласованными координатами в одной системе. Однако наземные классические методы создания ГКО заметно уступают спутниковым методам по производительности, точности и возможностям.

В 2004 г. был провозглашен переход к новой структуре ГГС, основанной на спутниковых методах координатных определений [34]. Далее государственная геодезическая сеть развивалась только спутниковыми методами.

Вопросы и задания

1. Сколько всего пунктов было в ГГС по состоянию на 1995 г.?
2. Почему наземные классические методы создания ГКО уступают спутниковым методам?
3. Обоснуйте необходимость перехода к спутниковым методам создания ГКО.

2.4. Пункты государственной сети, созданной наземными методами, – геодезическое наследие

Долговременно закрепленные центры государственной геодезической сети представляют большую ценность для реализации государственной координатной основы.

Основными элементами пунктов ГГС, созданной наземными (классическими) методами, являются:

- центр, к которому отнесены координаты. Может быть зарыт в земле, забетонирован в скале, здании и т. д. с соблюдением условия долговременной сохранности и неизменности положения. У одного пункта ГГС может быть несколько центров. Для закладки центров необходимо знать глубину промерзания грунтов, характеристики скальных пород и др.;

– наружный знак (пирамида, сигнал, тур и т. д.) для измерений оптическими методами. При обработке наблюдений триангуляции, полигонометрии, трилатерации необходимо было определять элементы центрировки и редукции, для приведения измерений к центрам пунктов. В настоящее время наружные знаки являются помехой для спутниковых измерений;

– внешнее оформление (окопка, сторожевой столб с охранной пластиной, ограда) для облегчения поиска пункта. В настоящее время при хорошем внешнем оформлении пункты можно увидеть на космических снимках.

Конструкция пунктов ГГС регламентируется соответствующими нормативными документами.

Фотографии разных вариантов и элементов геодезических пунктов можно найти в [35].

В настоящее время сохранность пунктов геодезической сети является зоной ответственности правообладателя земельного участка или объекта, в границах которого находится этот пункт. В пределах охранной зоны запрещаются любые действия, которые могут привести к его порче либо утрате, а в случае уничтожения или повреждения пункта в течение 15 календарных дней собственник обязан направить информацию об этом в Росреестр [25]. Несмотря на это, существует большая проблема сохранности геодезических пунктов. Многие из них утрачены по разным причинам, особенно в условиях городской застройки.

Хотя в настоящее время координаты пунктов определяются спутниковыми методами в геоцентрической системе ГСК-2011, основная ценность пунктов классических геодезических сетей – известные уравненные координаты в СК-95 и нормальные высоты в Балтийской системе высот.

С 01.01.2021 для выполнения геодезических и картографических работ была введена новая государственная геоцентрическая система координат ГСК-2011, однако картографические материалы, кадастровые карты и т. д. находятся в местных системах координат (МСК) или в СК-95. Для многих задач кадастра, прикладной геодезии, строительства, требуется «привязка» к СК-95 или МСК. Для точного перехода от ГСК-2011 к МСК или СК-95 и обратно необходимо выполнять ГНСС-измерения на пунктах, координаты которых известны в СК-95. Пока не существует прямого перехода от

ГСК-2011 к МСК, остается потребность выполнения ГНСС-измерений на пунктах АГС.

Существует необходимость обследования и восстановления геодезических пунктов для создания и ведения Единой электронной картографической основы (ЕЭКО) в рамках реализации государственной программы «Национальная система пространственных данных» с 01.01.2022 [30].

При обследовании геодезического пункта на месте проверяется состояние всех его элементов – центра, наружного знака, внешнего оформления. Восстановительные работы – приведение элементов геодезического пункта к нормативному состоянию. Однако при утрате центра (носителя координат) восстановление геодезического пункта не имеет смысла. Наружный знак в настоящее время не обязателен, поскольку мешает выполнению спутниковых измерений. Важной процедурой при этом является установление охранных зон, в соответствии с Положением об охранных зонах пунктов ГГС, государственной нивелирной сети и государственной гравиметрической сети [25].

Сведения о пунктах государственных геодезической, нивелирной, гравиметрической сетей, геодезических сетей специального назначения можно получить на Федеральном портале пространственных данных (ФППД) Роскадастра [48] (прил. 1).

На картографическом интерфейсе ФППД можно найти текущее состояние геодезических пунктов, которое актуализируется по результатам их обследования на местности. Также всем лицам, выполняющим геодезические и картографические работы, и правообладателям объектов недвижимости, на которых находятся пункты или их части, предоставлена возможность сообщать об их актуальном состоянии онлайн.

Альтернативным источником сведений о пунктах геодезических сетей являются созданные геодезистами открытые базы данных, основанные на опыте поиска пунктов, выданных за основу Росреестром. Например, веб-проект Geo-Bridge, <https://geobridge.ru/>, где можно найти информацию о геодезических пунктах и их состоянии, а также добавить результаты обследования геодезических пунктов. По каждому пункту предоставляется информация – состояние, фотография, подъезд к нему и др.

В прил. 2 приведен пример карты расположения рабочих

геодезических пунктов на территории Новосибирской области.

Существующие пункты государственной геодезической сети, созданные многолетним тяжелым трудом геодезистов, являются ценным геодезическим наследием государства, а также необходимым элементом для согласования государственных и местных систем координат.

Вопросы и задания

1. Назовите основные элементы геодезических пунктов.
2. Кто отвечает за сохранность геодезических пунктов? Изучить Положение об охранных зонах пунктов ГГС, государственной нивелирной сети и государственной гравиметрической сети.
3. Зачем необходимо сохранять пункты ГГС, когда в настоящее время развиваются спутниковые методы?
4. Найти сведения об ЕЭКО.
5. Что такое обследование и восстановление пунктов?
6. Зайти на Федеральный портал пространственных данных Роскадастра, ознакомиться с его структурой. Выписать предоставляемые сведения для заданного региона о пунктах ГГС, ГНС, ГГрС, ГССН (по одному пункту для каждой сети).
7. Зайти в базу данных Geo-Bridge, найти сведения о геодезических пунктах Новосибирской области. Сравнить сервис с ФППД.

3. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ

3.1. Создание государственных геодезических сетей спутниковыми методами

При создании современных геодезических сетей используется самый точный метод ГНСС – относительный, с продолжительными сеансами ГНСС-измерений в режиме статики. Продолжительные сеансы ГНСС-измерений (от суток и более) необходимы для уменьшения или исключения влияния многих систематических ошибок, которые не выявляются при коротких сеансах.

Первоначально определение координат пунктов высшего звена государственной геодезической сети – ФАГС – выполнялось относительно пунктов международной ГНСС-службы IGS в системе отсчета ITRF**. Результаты этих работ представлены в публикации Демьянова и др. [39]. Данная работа положила начало реализации государственной геоцентрической системы координат ГСК-2011. Дальнейшее развитие ФАГС, ВГС и СГС-1 выполнялось по принципу перехода от общего к частному, относительно уже существующих пунктов в системе координат ГСК-2011 на эпоху 2011.0. Результаты построения государственной геоцентрической системы координат изложены в [16, 39, 40].

Вопросы создания спутниковых геодезических сетей рассматривались в дисциплине «Спутниковые системы и технологии позиционирования», основные этапы приведены в табл. 5.

Определение координат исходного пункта спутниковой геодезической сети. В результате применения высокоточного относительного метода ГНСС вычисляются вектора базовых линий – приращения координат пар геодезических пунктов. Для определения собственно координат пунктов необходимо знать положение в геоцентрической системе минимум одного (исходного) пункта спутниковой геодезической сети. В настоящее время координаты исходных пунктов передаются относительным методом или от пунктов IGS (система координат ITRF**), или от действующих пунктов ФАГС (система координат ГСК-2011). Положение определяемых пунктов спутниковой геодезической сети

будет в той же системе отсчета и на ту же эпоху, в которой заданы координаты исходных пунктов. В лабораторной работе 1 [4] выполняется определение координат исходного пункта спутниковой геодезической сети.

Таблица 5

Этапы создания спутниковых геодезических сетей

Этап	Комментарии
Составление проекта сети	В соответствии с нормативными документами, регламентирующими плотность пунктов. Нет необходимости в прямой видимости между пунктами
Рекогносцировка и обследование	Выбор места закладки пункта, оптимального для ГНСС-измерений: открытый радиогоризонт, удобство подъезда, отсутствие источников радиопомех. Уточнение проектных данных. Обследование существующих пунктов ГГС для привязки к сети ГГС, определение возможности ГНСС-измерений
Закладка пунктов	В соответствии с техническим заданием. Тип центра, конструкция пункта, технология закладки определяются техническим заданием. Должны учитываться глубина промерзания грунтов и свойства скальных пород. Долговременное закрепление, неизменное положение центра
Установка оборудования для обеспечения непрерывных ГНСС-измерений и передачи результатов в центр обработки	Для постоянно действующих пунктов ФАГС и ГССН
Определение координат исходных пунктов спутниковой геодезической сети	Относительный метод ГНСС, длительные сеансы ГНСС-измерений, сдвоенные сеансы с перестановкой антенны, сетевой метод. Получение координат в ITRF относительно пунктов сети IGS
ГНСС-измерения с целью определения координат пунктов	Относительный метод ГНСС, длительные сеансы ГНСС-измерений, сдвоенные сеансы с перестановкой антенны, сетевой метод
Обработка результатов ГНСС-измерений. Уравнивание и получение координат пунктов	Соблюдение внутренних и внешних контролей результатов. Получение координат пунктов в геоцентрической системе, а также в системе координат, задаваемой заказчиком
Составление отчетов и передача их заказчику	Итог: заложенные пункты геодезической сети, с координатами и оценкой точности в единой государственной системе координат, технические отчеты о выполнении работ

Уравнивание спутниковых геодезических сетей. К уравниванию геодезических сетей, создаваемых спутниковыми методами, существуют два подхода.

1. Уравнивание «сырых» измерений кодовых и фазовых псевдодальностей, их разностей и комбинаций фаз. При уравнивании уточняются координаты пунктов и эфемериды спутников, оцениваются поправки часов спутников и приемников, параметры ориентировки Земли, ионосферные и тропосферные задержки. Координаты пунктов определяются в геоцентрической системе, в какой приведены эфемериды спутников. Такой подход реализован в научном программном обеспечении и используется при обработке ГНСС-измерений на станциях IGS и в других научных целях. Примеры научного программного обеспечения (ПО) – BERNECE (Швейцария), GAMIT GLOBK (Германия). Координаты первых пунктов ФАГС были получены после обработки в ПО BERNECE с данным подходом к уравниванию [9].

2. Сначала выполняется предварительная обработка ГНСС-измерений, в результате вычисляются вектора базовых линий (компоненты которых – приращения координат между пунктами). Далее уравниваются базовые линии в спутниковой геодезической сети. Такой подход реализуется в коммерческих ПО обработки ГНСС-измерений, например, в Trimble Business Center, CREDO GNSS, Leica Geo Office и др. Здесь для получения координат пунктов геодезической сети необходимо задать положение хотя бы одного опорного пункта, иначе система уравнений при уравнивании будет вырожденной. Координаты всех определяемых пунктов будут в той системе отсчета, в которой заданы положения опорных пунктов.

Минимально ограниченное и ограниченное уравнивание. Здесь уравниваются базовые линии – реализуется второй подход к уравниванию спутниковых измерений.

При минимально ограниченном уравнивании считаются безошибочными («фиксируются») три координаты одного исходного пункта сети, при этом вся сеть, составленная из векторов базовых линий, параллельным переносом «привязывается» к единственному пункту. Высокая точность (субсантиметровая) относительного метода сохраняется и в координатах определяемых пунктов. Минимально ограниченное уравнивание выполняется, как правило, в общеземной системе отсчета.

При ограниченном уравнивании «фиксируются» по три координаты нескольких исходных пунктов, процедура может выполняться как в обще-земной, так и в референцной системе координат. Здесь на результаты уравнивания влияют ошибки взаимного положения исходных пунктов, и высокая точность относительного метода ГНСС может не сохраниться. При уравнивании в референцной системе координат исходными пунктами являются пункты ГГС, созданной наземными методами, и все ошибки взаимного положения исходных пунктов в референцной системе будут сказываться на результатах уравнивания. Спутниковая геодезическая сеть при таком ограниченном уравнивании может трансформироваться как в масштабе (изменение длин линий), так и в ориентировании.

В пособии [4] предусмотрены два вида уравнивания – минимально ограниченное в геоцентрической системе отсчета и ограниченное в референцной системе отсчета, а также контроль и анализ результатов уравнивания. Кроме того, детали обработки и уравнивания ГНСС-измерений рассматриваются в дисциплинах «Спутниковые системы и технологии позиционирования» и «Применение глобальных спутниковых навигационных систем в геодезии и навигации» [5].

Таким образом, к настоящему времени созданы и продолжают развиваться государственные спутниковые геодезические сети: ФАГС, ВГС и СГС-1, реализующие государственную геоцентрическую систему координат ГСК-2011.

Вопросы и задания

1. Что такое относительный метод ГНСС, базовая линия, режим ГНСС-измерений «Статика»? Вспомнить дисциплины «Спутниковые системы и технологии позиционирования», «Применение глобальных спутниковых навигационных систем в геодезии и навигации».

2. Почему, на ваш взгляд, в коммерческих ПО реализован второй подход к уравниванию спутниковых сетей – через уравнивание базовых линий?

3. Почему минимально ограниченное уравнивание не деформирует спутниковую геодезическую сеть (не изменяет масштаб и ориентировку сети)?

4. Назвать критерии качества обработки базовых линий, критерии качества уравнивания спутниковых геодезических сетей. Вспомнить дисциплины

«Спутниковые системы и технологии позиционирования», «Применение глобальных спутниковых навигационных систем в геодезии и навигации».

5. Положение опорного пункта спутниковой геодезической сети получено в ITRF2020 на эпоху 2015.0. Каким образом можно получить координаты всех пунктов сети в ГСК-2011 на эпоху 2011.0? Сформулировать алгоритм действий (есть 2 варианта).

6. Сформулировать этапы создания фрагмента высокоточной геодезической сети, на пунктах которой не предусматриваются постоянные ГНСС-измерения.

3.2. Современная структура ГГС

В 2004 г. вышли «Основные положения о государственной геодезической сети России» [34], где была декларирована новая структура геодезической сети, основанная на применении спутниковых методов. Эта структура была подтверждена в 2017 г. и с изменениями в 2022 г. регламентирована Приказом Росреестра № П/0344 от 19.09.2022 [28].

Согласно этим нормативным документам, государственная геодезическая сеть предназначается для координатного обеспечения геодезических и картографических работ и строится по принципу перехода от общего к частному. В нее входят:

- ФАГС – фундаментальная астрономо-геодезическая сеть;
- ВГС – высокоточная геодезическая сеть;
- СГС-1 – спутниковая геодезическая сеть 1-го класса.

В структуру государственной геодезической сети входят также астрономо-геодезическая сеть 1-го и 2-го классов и геодезическая сеть сгущения 3-го и 4-го классов.

В ФЗ «О Геодезии...» [32] отмечается, что в составе государственной геодезической сети могут использоваться дифференциальные геодезические станции.

Во всех нормативных документах, относящихся к геодезическим сетям, обязательно отмечаются следующие характеристики:

- назначение сети;
- плотность пунктов (расстояния между пунктами);

- требования к точности положения пунктов;
- состав измерений на пунктах.

Перечисленные характеристики ФАГС, ВГС, СГС-1 приведены в табл. 6.

Таблица 6

Характеристики ФАГС, ВГС, СГС-1

Сеть	Назначение	Расстояние между смежными пунктами, км	Требуемая точность	Состав измерений
ФАГС	Установление и распространение единой геоцентрической системы координат ГСК-2011 на всю территорию страны	800–1 000	Пространственное положение относительно геоцентра – 0,1 м; взаимное положение – не более 0,02 м в плане и 0,03 м по высоте	ГНСС, абсолютная гравиметрия, геометрическое нивелирование I–II класса
ВГС	Сгущение ФАГС. Распространение единой геоцентрической системы координат ГСК-2011 на всю территорию страны	150–200	Взаимное положение относительно соседних пунктов ФАГС и ВГС $3 \text{ мм} + 5 \cdot 10^{-7} D$, по высоте не более $5 \text{ мм} + 7 \cdot 10^{-7} D$, где D – длина стороны в мм	ГНСС, относительная гравиметрия, геометрическое нивелирование I–II класса
СГС-1	Создание условий для перевода государственного геодезического обеспечения на спутниковые методы координатных определений. Предоставление данных пользователям	25–35	Взаимное положение $3 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-7} D$, по высоте не более $5 \text{ мм} + 7 \cdot 10^{-7} D$, где D – длина стороны в мм	ГНСС, геометрическое нивелирование II–III классов

Каждый из пунктов ФАГС и ВГС имеет геодезическую связь по крайней мере с одним пунктом триангуляции, с целью определения связи геоцентрической ГСК-2011 и референцной СК-95 систем координат.

Кроме перечисленных в таблице сетей к государственным относят астрономо-геодезическую, нивелирную и гравиметрическую сети. Согласно ФЗ «О геодезии...», ГГС, ГНС и ГГрС подведомственны федеральным органам исполнительной власти, а сведения о пунктах и координатах передаются заказчикам на безвозмездной основе, за исключением сведений, составляющих государственную тайну.

Государственные геодезические сети являются опорными для создания спутниковыми методами сетей специального назначения – например, таких, как городские геодезические сети, эталонные метрологические полигоны, опорные межевые сети, геодинамические полигоны, опорные геодезические сети для координатного обеспечения месторождений природных ресурсов, планово-высотное обоснование различного вида топографических съемок и т. д.

Существующая структура ГГС, декларируемая в [28], не застывшая навечно и может измениться, например, как представлено в [19].

Вопросы и задания

1. Изучить «Основные Положения о ГГС» [34], Федеральный закон «О геодезии...», а также Приказ Минэкономразвития «Об установлении структуры...» и Приказ Росреестра «Об установлении структуры...». Найти различия в структуре ГГС в этих документах. Почему появились эти различия?

2. Какое назначение ФАГС, ВГС и СГС-1 может быть еще, кроме реализации государственной геоцентрической системы координат? См. состав измерений на пунктах.

3.3. Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть

Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС) является высшим уровнем государственной геодезической сети, основное назначение которой – реализация государственной системы координат ГСК-2011. Кроме того, состав измерений, выполняемых на пунктах ФАГС (ГНСС, гравиметрия, нивелирование), позволяет использовать сеть при построении или уточнении моделей квазигеоида для дальнейшего спутникового нивелирования.

С техническими требованиями к пунктам ФАГС можно ознакомиться в [14], где приведены общие требования к измерениям, местоположению, закреплению пунктов, измерительной аппаратуре и методам измерений, отчетной документации.

В отличие от пунктов АГС, созданных наземными методами:

- пункт ФАГС – не единственный центр, а система центров, включающая основной, рабочий и контрольный центры, а также основание для выполнения абсолютных и относительных гравиметрических измерений;

- на пункте ФАГС выполняется комплекс высокоточных измерений – ГНСС (постоянные и периодические), нивелирование (I–II классов) и абсолютные измерения силы тяжести.

Основные и контрольные центры имеют долговременное закрепление на земле (см. типы центров для сезонного промерзания грунтов, для многолетней мерзлоты, для скальных грунтов в [14]), а рабочие центры, предназначенные для постоянных ГНСС-измерений, в большинстве случаев – на крышах зданий. Все пункты ФАГС имеют центрировочные устройства для установки ГНСС-антенны [14]. На последних заложенных пунктах ФАГС имеются 2 рабочих центра, а также внешний стандарт частоты для синхронизации часов ГНСС-приемника. На рис. 8 приведено фото пункта ФАГС с двумя рабочими центрами.

Координаты первых заложенных пунктов ФАГС определялись по результатам общего уравнивания сети с опорой на ближайшие пункты Международной ГНСС-службы IGS на территории Российской Федерации и соседних стран. Общее количество пунктов, включенных в уравнивание ФАГС, – 46, из них 38 российских и 8 зарубежных; число опорных пунктов – 21 (российских – 13, зарубежных – 8) [22].

В обработку вошли суточные файлы ГНСС-наблюдений на пунктах ФАГС на интервале 2 лет (2010–2011 гг.); обработка была выполнена с помощью программного комплекса BERNES 5.0. [22].

Начальные значения координат на эпоху 2011.0 для пунктов IGS выбирались из международного каталога ITRF, а для других пунктов использовались априорные значения координат и значения скоростей, вычисленные по геодезической модели NUVELL.



Рис. 8. Пункт ФАГС на о. Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа) с двумя рабочими центрами, [22]

При уравнивании ГНСС-измерений сеть рассматривалась как «свободная», когда координаты опорных пунктов не фиксировались, а вычислялись вместе с координатами других пунктов. Средние квадратические погрешности уравненных координат пунктов ФАГС составили 0,1–1,0 см в плане (пункт ФАГС «Владивосток» – 1,9 см) и 0,2–1,5 см по высоте (пункт ФАГС «Владивосток» – 2,14 см) [9]. Дальнейшее определение координат новых пунктов ФАГС выполнялось относительным методом ГНСС от уже имеющихся опорных пунктов.

В 2020–2023 гг. была проведена большая организационная и производственная работа, заложены несколько десятков пунктов ФАГС в труднодоступных районах на территории Сибири и Дальнего Востока, организованы постоянные ГНСС-наблюдения на них. Геодезическое предприятие АО «Инжгеодезия» г. Новосибирска принимало активное участие в этих работах. На рис. 9 представлен процесс закладки основного центра пункта ФАГС в пос. Онгудай (Республика Алтай) специалистами АО «Инжгеодезия».

В Национальном докладе для Международной ассоциации геодезии и Международного геодезического и геофизического союза 2019–2022

приведены основные результаты построения ФАГС. На 1 января 2023 г. эта сеть содержит 99 пунктов [22] (рис. 10).



Рис. 9. Закладка основного центра ФАГС в пос. Онгудай, АО «Инжгеодезия»

В ФГБУ «Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» организован центр точных эфемерид [50], на сайте которого www.rgs-centre.ru можно получить следующую информацию:

- карта расположения пунктов ФАГС;
- координаты и скорости пунктов в ГСК-2011 на 2011.0;
- сведения о пунктах (карточки пунктов: примерное расположение на карте, фотографии при наличии, используемая ГНСС-аппаратура, высота антенны и др.);
- Rinx-файлы ГНСС-измерений и навигационных сообщений на пунктах ФАГС (для зарегистрированных пользователей);
- точные эфемериды спутников ГНСС.

Карта постоянно действующих пунктов ФАГС на 18.10.23 (с сайта RGS-Center) приведена в прил. 3.

Скриншот экрана сайта RGS-center (скачивание Rinx-файлов для пунктов ФАГС) приведен в прил. 4.



Рис. 10. Расположение пунктов ФАГС на 01.01.2023, [22]

В геоцентрической системе координат ГСК-2011 координаты пунктов-носителей этой системы получены с высокой миллиметровой точностью. Современные каталоги высокоточных геоцентрических координат относятся, как правило, к некоторой заданной опорной эпохе и содержат не только координаты, но и скорости пунктов, а также средние квадратические погрешности этих величин (например, ITRF2020 [57]). Определение и уточнение скоростей пунктов ФАГС является актуальной задачей, поскольку:

- значительное количество пунктов ФАГС было заложено относительно недавно, и нет достаточной продолжительности наблюдений для уверенного определения скоростей;

- в принятой в ITRF2020 модели движения литосферных плит не включены Охотоморская и Амурская плиты, расположенные на территории России;

- для развития перспективного метода точного точечного позиционирования необходима процедура приведения результатов с эпохи наблюдения на опорную эпоху, для чего также необходимо знать скорости пунктов.

Вопросы, касающиеся определения и уточнения скоростей движения

пунктов ФАГС, рассмотрены в [6, 20, 22].

Перспективы дальнейшего развития ФАГС:

- увеличение количества пунктов (100–300), особенно в геодинамически активных регионах (Дальний Восток, Север, Северный Кавказ, Крым, Байкальская рифтовая зона);
- включение некоторых пунктов в сеть IGS;
- обновление аппаратно-программного обеспечения;
- уточнение скоростей движения пунктов ФАГС;
- создание онлайн-сервисов обработки данных, в том числе пересчета координат из ГСК-2011 в местные системы координат МСК.

Пункты ФАГС, имеющие фундаментальное заложение, оснащенные современной аппаратурой, с высокоточными нормальными высотами и абсолютными значениями силы тяжести, представляют большую ценность для решения научных и прикладных задач геодезии. Перспективным для мирового геодезического сообщества было бы включение некоторых пунктов ФАГС в сеть международной ГНСС-службы IGS [38]. Увеличение количества пунктов IGS с координатами в ITRF на территории России имеет преимущества, а именно:

- повышение точности единой координатной основы России;
- возможность уточнения модели движения литосферных плит;
- уточнение эфемерид спутников, моделей тропосферы и ионосферы по наблюдениям со станций на территории России.

Для включения пунктов ФАГС в сеть IGS необходимо соответствие техническим требованиям к пунктам и соответствующее информационно-программное сопровождение, а также решение политических противоречий.

Вопросы и задания

1. На основании изучения технических требований к пунктам ФАГС [14] ответить на вопросы.

Какие методы ГНСС-измерений используются?

Какие требования предъявляются к ГНСС-аппаратуре?

Предусмотрено ли использование ГНСС GALILEO BeiDow?

Минимальное количество наблюдаемых спутников и максимальное

значение геометрического фактора?

Требования к точности положения пункта ФАГС относительно геоцентра и относительно ближайших пунктов.

2. Какие измерения, кроме ГНСС, предусматриваются на пунктах ФАГС?

3. Возможно ли использование пунктов ФАГС как дифференциальных геодезических станций? Обосновать ответ.

4. При решении каких задач (конкретно) используются постоянные спутниковые наблюдения на пунктах ФАГС?

3.4. Сгущение ФАГС: высокоточная геодезическая сеть и спутниковая геодезическая сеть 1-го класса

3.4.1. *Высокоточная геодезическая сеть*

Высокоточная геодезическая сеть является сетью сгущения ФАГС и предназначена для дальнейшего распространения высокоточной системы координат ГСК-2011. В [15] приведены технические условия для создания ВГС, содержащие основные требования к сети и самим пунктам.

В настоящее время ВГС насчитывает 308 пунктов, по возможности равномерно распределенных по территории России (рис. 11).

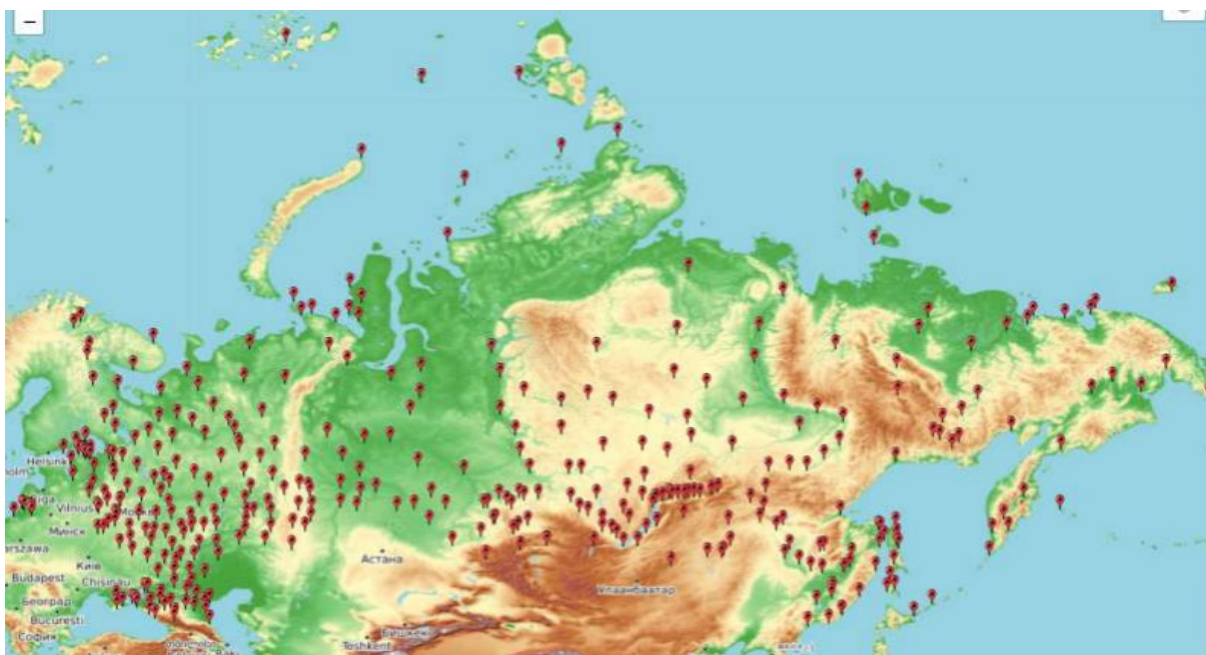


Рис. 11. Сеть пунктов высокоточной геодезической сети

На сайте ЦГКиИПД в разделе «Открытые данные – высокоточная геодезическая сеть» приводятся сведения о регионе, идентификаторе и типе пункта, о положении пунктов. Фрагмент сведений приведен в табл. 7, где фнд. рп. – фундаментальный репер, гр. рп. – грунтовый репер.

Таблица 7

Фрагмент сведений о высокоточной геодезической сети с сайта ЦГКиИПД

№	Федеральный округ	Субъект федерации	Название пункта ВГС	Геодезический пункт/репер (номер марки, класс пункта)	ID	B ° ,	L ° ,
1	Северо-Западный	Республика Карелия	Алакургти	Фнд. рп. 6965	ALAK	66 57,33	30 17,82
2	Северо-Западный	Ненецкий АО	Амдерма	Гр. рп. 7108	AMD	69 45,54	61 40,74
3	Северо-Западный	Архангельская обл.	Вендинга	Гр. рп. 4576	VEND	63 24,1	47 53,1
4	Северо-Западный	Архангельская обл.	Верхняя Тойма	Гр. рп. 6237	VTOY	62 13,38	44 57,42

Значительная часть из пунктов ВГС – существующие пункты АГС, ГНС, ГГрС, координаты которых получены относительным методом ГНСС от пунктов ФАГС в системе ГСК-2011. Следует отметить, что указанные существующие пункты, хоть и являются ценными носителями координат ГСК-2011, но не имеют устройств принудительного центрирования для выполнения спутниковых измерений, что может привести к ошибкам в координатах из-за ошибок центрирования при повторных измерениях.

3.4.2. Спутниковая геодезическая сеть 1-го класса

Спутниковая геодезическая сеть 1-го класса предназначена для распространения государственной системы координат пользователям. Пункты СГС-1 располагаются главным образом в европейской части страны, а за Уралом – вдоль магистралей и рек (рис. 12). Технические требования к пунктам СГС-1 приведены в [13].



Рис. 12. Спутниковая геодезическая сеть 1-го класса

Общее количество пунктов СГС-1 – 5 860, со средним расстоянием между соседними точками от 25 до 35 км. В отличие от большинства пунктов ВГС, пункты СГС-1 закладывались специально, для возможностей выполнения высокоточных спутниковых определений. На рис. 13 видно внешнее оформление – ограда, окопка, устройство для принудительного центрирования, охранный пластина, боковой репер для установки нивелирной рейки. Многие пункты СГС-1 являются контрольными центрами пунктов ФАГС, например, пункты Марусино (MARU) и Каинская (KAIN) для пункта Новосибирск (NSK1).

Концепция создания СГС-1 с целью распространения пользователям была опубликована в Основных положениях о ГГС еще в 2004 г., когда не было современного распространения постоянно действующих базовых станций ГНСС (дифференциальных базовых станций). В настоящее время именно эти станции являются основным поставщиком услуг для выполнения множества геодезических работ (для обеспечения координат пользователям), и пункты СГС-1 можно рассматривать только как долговременно закрепленные центры – носители координат в ГСК-2011 и как контрольные центры для ФАГС.



Рис. 13. Пункт СГС-1 MARU (Марусино)

Вопросы и задания

1. С какой точностью (в метрах) приведены координаты пунктов ВГС на сайте ЦГКиИПД?
2. Почему многие пункты ВГС не вполне пригодны для выполнения высокоточных ГНСС-измерений?
3. Изучить технические условия для пунктов ВГС и СГС-1. Ответить на вопросы.
Какие методы ГНСС-измерений используются?
Какие требования предъявляются к ГНСС-аппаратуре?
Требования к точности положения пунктов ВГС и СГС-1 относительно ближайших пунктов.
4. Чем технические условия для пунктов ВГС отличаются от технических условий для пунктов ФАГС?
5. При решении каких задач геодезии могут использоваться пункты ВГС и СГС-1?

3.5. Дифференциальные геодезические станции

Постоянно действующие базовые станции ГНСС (Continuously Operate Reference Station, CORS) в настоящее время широко используются для

решения различных научных и прикладных задач. Поскольку точные координаты этих станций известны, то по результатам постоянных ГНСС-измерений можно формировать дифференциальные поправки и передавать их пользователям в реальном времени, реализуя тем самым метод кинематики в реальном времени (Real Time Kinematic, RTK). Возможна работа как одиночных базовых станций, так и сети этих станций. Метод RTK подробно рассматривается в дисциплинах «Спутниковые системы и технологии позиционирования» и «Применение ГНСС в геодезии и навигации».

В ФЗ «О геодезии...» [32] постоянно действующая базовая станция ГНСС, передающая поправки в режиме RTK, определяется как дифференциальная геодезическая станция – «электронное устройство, размещенное на точке земной поверхности с определенными координатами, выполняющее прием и обработку сигналов спутниковых навигационных систем и обеспечивающее передачу информации, необходимой для повышения точности определения координат в результате выполнения геодезических работ с использованием спутниковых навигационных систем».

Задачи, решаемые на основе использования ДГС:

- формирование активного координатно-временного пространства региона;
- непрерывное геодезическое и навигационное обеспечение широкого круга потребителей;
- реализация информационных технологий в геодезической и кадастровой деятельности;
- интеграция сетей соседних регионов для обеспечения единства геопространства Российской Федерации.

Дифференциальные геодезические станции в России создавались разновременно в течение последних 20 лет различными государственными и частными организациями. К настоящему времени насчитывается более 1 000 станций. Координаты станций определялись разными технологиями, с разной точностью и на разные эпохи, уравнивание производилось не в единой системе координат и высот (относительно разных опорных пунктов). Со стороны государства практически не было нормативно-технического и правового регулирования.

Качество функционирования большинства ДГС зависит только от их собственников, что неприемлемо для выстраивания на их основе спутниковых геодезических сетей. Различные системы отсчета, разные ведомства создают проблему объединения сетей ДГС в одну государственную сеть.

Существует актуальная задача интеграции отдельных ДГС в единую геодезическую сеть и ее уравнивание, в результате – получение каталога координат и скоростей пунктов с оценкой точности.

Кроме того, необходимо нормативно-правовое регулирование в области создания и развития ДГС и их сетей. В 2020 г. вышел приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии «Об установлении требований к программным и техническим средствам, используемым при создании сетей дифференциальных геодезических станций» [29], где регулируется создание дифференциальных базовых станций. Однако в этом документе практически нет требований к оценке качества работы дифференциальных станций, как и многого другого, прописанного, например, в требованиях к постоянно действующим станциям США (Continuously Operated Reference Station, CORS USA) [53].

В настоящее время многие производители и дилеры спутниковой аппаратуры предлагают создание «под ключ» постоянно действующих базовых станций или их сетей, а также информацию от уже существующих сетей базовых станций (дифференциальные поправки и RINEX-файлы для постобработки). Например, сайт EFT CORS от компании «Эффективные технологии» содержит сведения о базовых станциях, предоставляет дифференциальные поправки от базовых станций, RINEX-файлы и информационную поддержку. На 15.10.2023 насчитывается 696 работающих дифференциальных геодезических станций EFT CORS, и, кроме того, десятки станций планируются к запуску работы в настоящее время. Фрагмент карты сети EFT CORS приведен на рис. 14. Для выбранных на карте станций появляется краткая информация с возможностью перехода по вкладкам (оранжевый цвет на рисунке).

Некоторые сведения о сетях дифференциальных геодезических станций приведены в описании лабораторной работы № 8 практикума по дисциплине «Применение глобальных спутниковых навигационных систем в геодезии и навигации» [5].

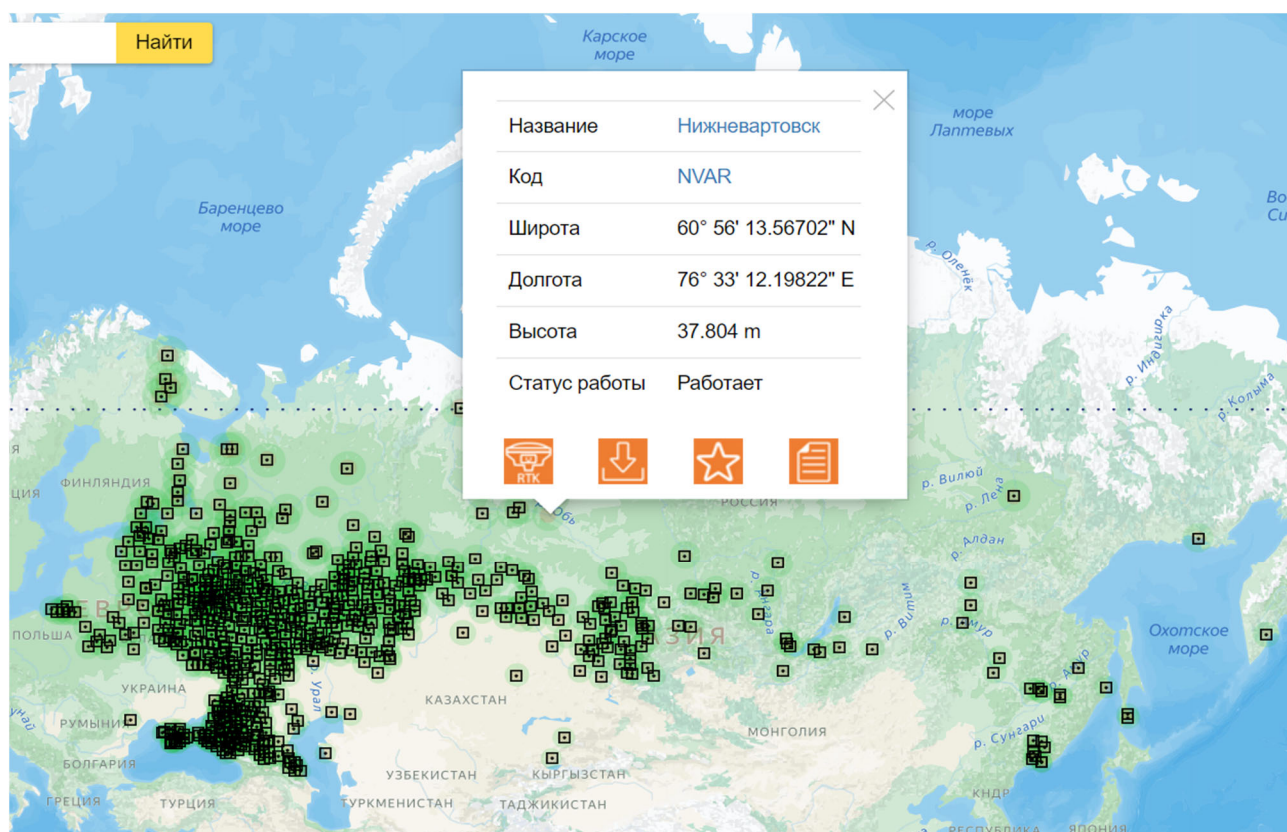


Рис. 14. Фрагмент карты расположения базовых станций EFT CORS,
<https://bp.eft-cors.ru/basestations/map>

В центре геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных при Росреестре организована Федеральная сеть геодезических станций ФСГС с аппаратно-программным комплексом (АПК). Многочисленные частные дифференциальные станции объединяются здесь по добровольному согласию вместе с постоянно действующими пунктами ФАГС. С помощью АПК обеспечивается ежедневное определений координат и мониторинг сетей.

Решение о включении дифференциальной геодезической станции в сеть производится оператором ФСГС.

Эксплуатация и обновление оборудования геодезических станций, метрологическое обеспечение, а также поддержание непрерывно функционирующего канала связи обеспечивается их владельцами. Ответственность за качество оказываемых услуг и достоверность передаваемой потребителям измерительной информации несет владелец геодезической станции.

Геодезическая станция может быть исключена из ФСГС по инициативе оператора ФСГС по факту обнаружения ее несоответствия установленным требованиям.

В прил. 5 представлена карта размещения постоянно действующих станций, включенных в Федеральный фонд пространственных данных, а прил. 6 есть скриншот страницы сайта ФСГС со сведениями о дифференциальных геодезических станциях и их операторах.

Таким образом, создание и развитие федеральной сети геодезических станций обеспечивает владельцам и пользователям ДГС:

- периодическое определение координат станций в ГСК-2011;
- периодический контроль стабильности рабочего центра;
- архивное хранение информации за время функционирования станций в составе ФСГС;
- информирование о соответствии ДГС требованиям нормативных документов.

Дальнейшее развитие координатного обеспечения с использованием дифференциальных геодезических станций связано с предоставлением пользователям в реальном времени высокоточных координат в местных системах МСК и нормальных высот в БСВ-77, а именно:

- корректное трансформирование изменяющихся во времени координат в ГСК-2011 в неизменные координаты в местных системах МСК;
- построение высокоточных моделей квазигеоида для спутникового нивелирования.

Вопросы и задания

1. Что такое дифференциальная геодезическая станция? Чем постоянно действующие пункты ФАГС отличаются от ДГС?
2. Перечислить задачи, для решения которых используются ДГС.
3. Изучить требования к ДГС [29], ответить, удовлетворяет ли им дифференциальная геодезическая станция NSKW, расположенная на крыше лабораторного корпуса СГУГиТ.
4. Зайти на сайты нескольких операторов ДГС, например, EFT CORS (АО «Эффективные технологии», PrinNet (АО «ПРИН») и т. д., сравнить предоставляемую информацию, цены на услуги, количество станций и пр.

5. Какие проблемы решает объединение ДГС в ФСГС?

6. Зайти на сайт ФСГС, сравнить с сайтом EFT CORS. Какие конструктивные предложения можно сделать по поводу функционирования этих сайтов?

4. ГОСУДАРСТВЕННАЯ ВЫСОТНАЯ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ ОСНОВА

4.1. Государственная высотная основа

4.1.1. Системы высот

Для изучения основ создания государственной высотной основы полезно повторить некоторые определения по теме. На рис. 15 показаны основные отсчетные поверхности в геодезии – эллипсоид, геоид и квазигеоид. Геометрически высота точки A , как расстояние до отсчетной поверхности по нормали к эллипсоиду, может быть:

- нормальная H^{γ} – до квазигеоида;
- ортометрическая H^g – до геоида;
- геодезическая H – до эллипсоида.

Разность геодезической высоты с нормальной ζ_A есть высота квазигеоида над эллипсоидом, а разность с ортометрической высотой N называется аномалией высоты.

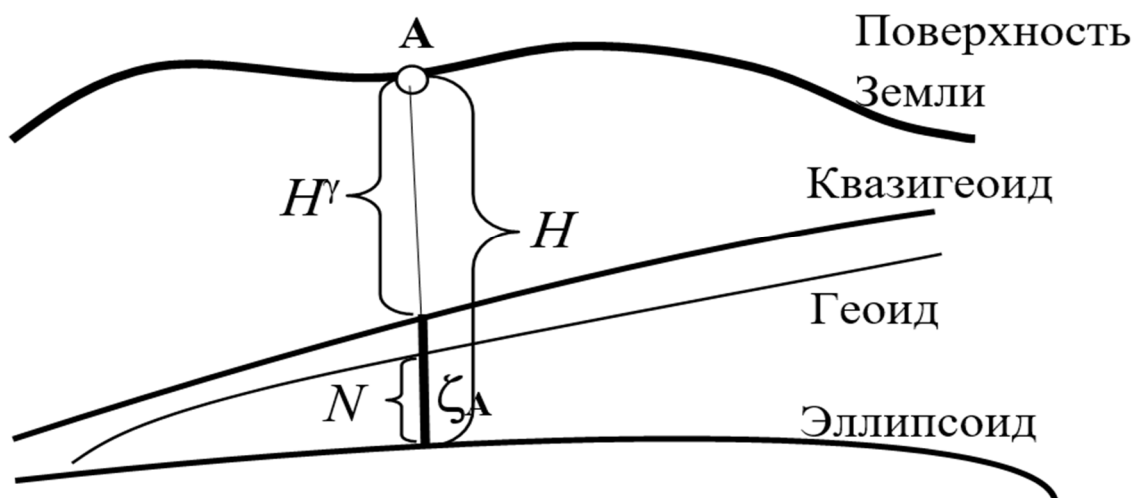


Рис. 15. Основные отсчетные поверхности

Как отмечалось в подразд. 1.2, современная координатная основа разделяется на геометрическую и физическую части. К геометрической относятся, в первую очередь, геоцентрические пространственные координаты XYZ , определяемые по результатам псевдодальномерных спутниковых измерений, и вычисленные геодезические широта, долгота и высота BLH относительно эллипсоида с заданными параметрами (a, e) . Между пространственными и эллипсоидальными координатами существует математическая связь, не зависящая от физических свойств Земли.

К физической части относятся высоты, определяющие энергетический уровень той или иной точки в поле силы тяжести. Разность высот точек в физическом смысле определяется разностью потенциалов силы тяжести или работой, которую совершает сила тяжести при перемещении из одной точки в другую. Высота точки A над принятой уровенной поверхностью с потенциалом W_0 определяется нивелированием и измерением силы тяжести

$$H_A = \frac{W_0 - W_A}{g} = \frac{\int g dh}{g}, \quad (1)$$

где $W_0 - W_A$ – разность потенциалов между нулевой уровенной поверхностью и уровенной поверхностью в точке A ; dh, g – измеренные превышения и сила тяжести на станциях нивелирования.

Поскольку сила тяжести на земле в разных точках не одинакова, то, в соответствии с формулой, высота точки A будет зависеть от пути нивелирования. В связи с этим были приняты некоторые ограничения, которые привели к обоснованию нескольких систем высот – в зависимости от знаменателя в формуле (1). Подробно системы высот рассматривались в дисциплинах «Высшая геодезия», «Физическая геодезия».

В национальных системах высот в настоящее время используются ортометрические и нормальные высоты (табл. 8).

Систему нормальных высот разработал в 1940-х гг. выдающийся русский ученый М. С. Молоденский, где основной идеей было то, что можно получить квазигеоид только по измерениям на поверхности Земли, не зная распределения масс внутри Земли, если откладывать вниз нормальные высоты.

Характеристики ортометрической и нормальной систем высот

Характеристика	Ортометрические высоты H^g	Нормальные высоты H^γ
Формула	$H_A = \frac{W_0 - W_A}{g_A^{cp}} = \frac{\int g dh}{g_A^{cp}}$	$H_A = \frac{W_0 - W_A}{g_A^{cp}} = \frac{\int g dh}{g_A^{cp}}$
Знаменатель в формуле	Среднее значение силы тяжести вдоль отвесной линии от точки до нулевой уровенной поверхности	Среднее значение нормальной силы тяжести в точке на поверхности Земли
Зависимость от пути нивелирования	Не зависит	Не зависит
Высоты разных точек на одной и той же уровенной поверхности	Различны («вода не любит ортометрических высот»)	Различны (одинаковы только для одной и той же параллели)
Строгое определение	Не могут быть определены строго (должна быть скважина для измерения g по всей длине)	Могут быть определены с требуемой точностью

Различие между высотой геоида N и высотой квазигеоида ζ над эллипсоидом (см. рис. 15) определяется соотношением

$$N - \zeta \approx \frac{\Delta g_B}{\gamma_0} H^\gamma, \quad (2)$$

где γ_0 – среднее значение нормальной силы тяжести на общеземном эллипсоиде; Δg_B – аномалия Буге.

В равнинных и всхолмленных районах ($H < 500$ м) расстояние между геоидом и эллипсоидом менее 2,5 см, в горных районах при высотах 5 км и выше расстояние может достигать величины 2 м [37].

В геодезии кроме ортометрических и нормальных высот применяются динамические и условные высоты (см. дисциплины «Высшая геодезия»,

«Физическая геодезия»), но они не используются при создании государственной высотной основы.

При картографировании территорий, строительстве, решении многих научных и прикладных задач геодезии используются не геометрические (эллипсоидальные), а физические высоты, поскольку именно они определяют разность уровенных поверхностей, рельеф. Например, из-за наклона квазигеоида к эллипсоиду разности эллипсоидальных и нормальных высот двух точек могут быть с обратным знаком, то есть эллипсоидальные высоты будут показывать наклон («рельеф») в другую сторону, чем есть на самом деле.

При геометрическом нивелировании I и II классов, при больших расстояниях и высоких требованиях к точности вычисления высот, в непосредственно измеренное превышение вводятся поправка за непараллельность уровенных поверхностей (вычисляется) и поправка за отличие действительного поля силы тяжести от нормального (по результатам гравиметрических измерений):

$$\Delta H_{AB}^{\gamma} = \Delta H_{AB} + \left[\frac{1}{\gamma_{\text{cp}}}(\gamma_0^A - \gamma_0^B) + \frac{1}{\gamma_{\text{cp}}}(g - \gamma)_{\text{cp}} \right] \Delta H_{AB}, \quad (3)$$

где ΔH_{AB}^{γ} – разность нормальных высот точек A и B ; ΔH_{AB} – измеренное превышение; $\frac{1}{\gamma_{\text{cp}}}(\gamma_0^A - \gamma_0^B)$ – поправка за непараллельность уровенных поверхностей; γ_0^A, γ_0^B – значение нормальной силы тяжести на эллипсоиде в точках A и B ; γ_{cp} – среднее значение нормальной силы тяжести в точках A и B ; $\frac{1}{\gamma_{\text{cp}}}(g - \gamma)_{\text{cp}}$ – поправка за отличие действительного поля силы тяжести от нормального; g – действительное значение силы тяжести по результатам гравиметрических измерений.

Таким образом, при высокоточном определении нормальных высот геометрическим нивелированием I и II классов необходимо выполнять гравиметрические измерения.

Геометрическое нивелирование I и II классов на настоящий день

является самым трудоемким и ответственным видом полевых геодезических работ, требующим высокой квалификации исполнителя. Подробное описание технологии полевых и камеральных работ приведено в Инструкции по нивелированию [10].

4.1.2. Государственная высотная основа России

Национальной системой высот в геодезии называется принятый стандарт для определения высот точек на местности. В России принята Балтийская система высот БСВ-77. Начало – нуль-пункт Кронштадтского футштока (рис. 16). Вертикальной координатой точки является разность нормальных высот с нуль-пунктом. Поскольку поправки за прилив не вводились, то принята система среднего прилива (mean tide).



Рис. 16. Исходный пункт государственной высотной основы СССР – России: Кронштадтский футшток

Государственная высотная основа (ГВО) реализуется каталогом пунктов государственной нивелирной сети (ГНС), определенных методом

геометрического нивелирования. Здесь действуют общие принципы создания геодезических сетей – переход от общего к частному и всевозможные внутренние и внешние контроли. Государственную нивелирную сеть образуют полигоны I класса и заполняющие сети II класса, общая протяженность линий нивелирования I–II классов около 400 тыс. км.

На 01.05.2023 в составе государственной высотной основы было 105 000 реперов, из которых 58 867 пунктов I класса и 45 606 пунктов II класса. Эта сеть включает в себя 188 полигонов I класса, 880 полигонов II класса и смешанные полигоны I и II классов (рис. 17).

Средний периметр полигона I класса для территории Российской Федерации составляет 1,5 тыс. км, причем в Европейской части на 1 тыс. км (с 0,2 тыс. км до 2,6 тыс. км), в Сибири и на Дальнем Востоке – на 2,2 тыс. км (с 0,4 тыс. км до 4,7 тыс. км) [21, 22].

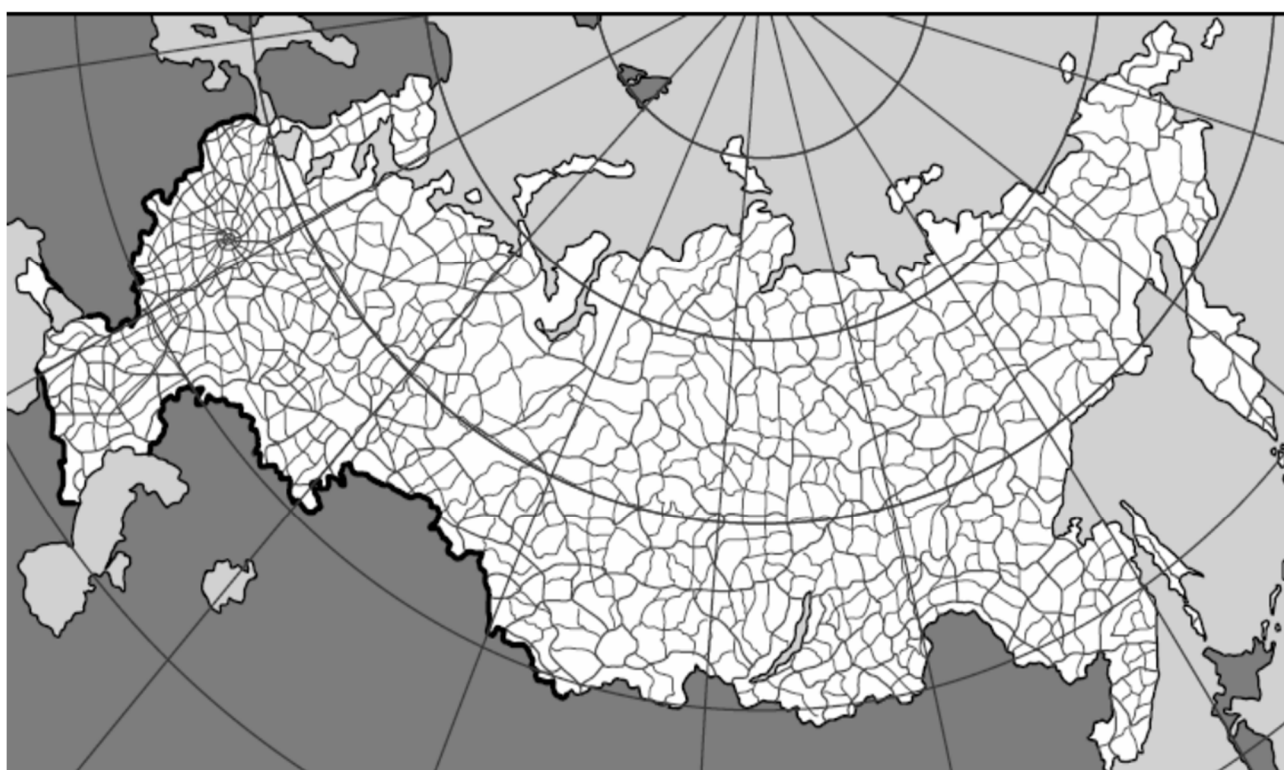


Рис. 17. Главная высотная основа Российской Федерации [22]

На основе I и II классов создаются сети государственного нивелирования III и IV классов.

Проблемы государственной высотной основы:

– вся нивелирная сеть опирается на единственный исходный пункт, не имеет внешнего контроля и уравнивается как свободная система. Следствие этого – неизбежное накопление систематических ошибок, зависящих от расстояния, с запада на восток страны, где ошибка передачи высоты порядка 1 метра и более на Дальнем Востоке. При этом точность взаимного положения ближайших реперов – высокая, в соответствии с Инструкцией по нивелированию;

– реализованы только внутренние контроли по замыканию полигонов;

– геометрическое нивелирование на пунктах ГВО выполнялось в разное время без привязки ко времени и учета геодинамики;

– многие пункты ГВО утрачены или изменили свое положение по высоте, например, в зонах вечной мерзлоты (выпучивание);

– общего уравнивания нивелирной сети не было с 1977 г.;

– требуется обновление ГВО, повторные измерения, переуравнивание государственной нивелирной сети;

– отсутствие единой высотной основы и параметров связи между БСВ-77 и условными системами высот (уровнемерные посты, континенты, моря и острова). Разница с БСВ-77 от $-0,18$ до $+0,88$ м. Необходимо объединение систем высот на континенте, морях и островах, установление связи с другими системами высот. В настоящее время это сложно из-за наличия систематической ошибки [40].

Работы по обновлению и развитию ГВО выполнялись по четырем основным программам, начиная с 1991 г. По двум программам модернизации ГВО (на период 1991–2000 и 2001–2010 гг.) работы были выполнены на менее чем 50 % из запланированного нового и повторного нивелирования I и II классов [49], неполный объем выполненных работ был из-за недостаточного финансирования. Две последние актуальные программы оптимизации и модернизации ГВО выполнены и имеют продолжение:

1) «Оптимизация ГВО в пограничных областях РФ с целью формирования полигонов I–II классов для связи национальных нивелирных сетей стран, граничащих с Россией» (2012–2018 гг.). Задача данной программы состояла в том, чтобы замкнуть нивелирные полигоны I класса по границам

России, созданные еще в советское время, но оказавшиеся незамкнутыми после отделения части территорий бывшего СССР в 1991 г.;

2) «Модернизация ГВО РФ с целью обновления высот по линиям нивелирования ГВО, измеренным в 60-х и 70-х годах прошлого столетия». Выполнение повторного нивелирования I и II классов по линиям с наибольшим коэффициентом старения или прокладка новых линий с целью улучшения характеристик полигонов, не удовлетворяющих требованиям нормативных документов.

В рамках последней программы модернизации ГВО ежегодно выполняются работы по геометрическому нивелированию специалистами из «АО Роскартография» и ее дочерних обществ, а также ФГБУ «Центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных». С октября 2022 г. указанные организации вошли в состав публично-правовой компании «Роскадастр».

В рамках модернизации главной высотной основы выполняются работы по обновлению высот по линиям нивелирования ГВО, рекогносцировка трасс нивелирования I класса, закладка новых нивелирных пунктов, обследование и восстановление нивелирных реперов, выполнение двойного хода нивелирования I класса. Также предусматривается определение координат пунктов ГВО спутниковыми методами.

4.1.3. Гравиметрическое обеспечение государства

Гравиметрическое обеспечение России реализуется по принципу перехода от общего к частному государственной фундаментальной гравиметрической сетью, а также государственной гравиметрической сетью I класса. Пункты ФАГС и ВГС, на которых выполнены абсолютные и относительные гравиметрические измерения, также включены в государственную гравиметрическую сеть.

На рис. 18 показана карта расположения гравиметрических пунктов – 121 фундаментальный пункт, 577 основных пунктов 1-го класса и 5 планируемых гравиметрических пунктов непрерывного мониторинга. Как видно из рисунка, пункты непрерывного гравиметрического мониторинга планируется разместить на трех обсерваториях РСДБ (радиоинтерферометрии со

сверхдлинной базой) сети «Квазар-КВО» (Светлое, Зеленчукская, Бадары) и на предприятиях в Москве и Новосибирске.



Рис. 18. Государственная гравиметрическая сеть по состоянию на 01.01.2023 [22]

Основные задачи современной геодезии, для решения которых необходимы гравиметрические измерения:

- определение гравиметрических поправок в геометрическое нивелирование;
- создание детальных цифровых гравиметрических карт для спутникового нивелирования;
- построение глобальных моделей гравитационного поля Земли;
- корректная интерпретация геодинамических явлений.

Приоритетные направления развития гравиметрического обеспечения:

- развитие гравиметрической сети – увеличение количества пунктов, обновление, уравнивание сети;
- развитие средств гравиметрических измерений – отечественных абсолютных и относительных гравиметров.

Вопросы и задания

1. Дать определение ортометрической и нормальной высоты. Сходство и различие системы нормальных высот и системы ортометрических высот.
2. Почему в геодезической практике необходимо знать нормальные, а не геодезические высоты?
3. Может ли у одной и той же точки быть несколько геодезических высот? Несколько нормальных высот?
4. Какие поправки вводятся в измеренные геометрическим нивелированием превышения и в каких случаях?
5. Проблемы главной высотной основы.
6. Современные работы по модернизации главной высотной основы.
7. Перечислить задачи, для решения которых необходимо знать ускорение силы тяжести.
8. Относительные и абсолютные гравиметрические определения. Чем они отличаются? Какие из них выполняются на пунктах ФАГС и ВГС?

4.2. Направления развития государственной высотной основы

4.2.1. Общие положения

Существующая государственная высотная основа России нуждается в обновлении и модернизации. Сюда входит обследование и восстановление нивелирных пунктов, закладка новых пунктов, геометрическое нивелирование на пунктах ГНС (в том числе повторное), определение нормальных высот пунктов ФАГС, ВГС, СГС-1 и включение результатов в общее уравнение ГНС, переуравнивание ГНС. Необходимы усовершенствование технологии геометрического нивелирования, разработка приборного и программного обеспечения.

Кроме того, в связи с развитием ГНСС-технологий и прогрессом в разработках моделей геоида появляются альтернативы как геометрическому нивелированию, так и общим принципам установления систем высот.

Далее будут рассмотрены следующие направления развития ГВО:

- развитие метода спутникового нивелирования;

- разработка новых принципов установления системы нормальных высот;
- построение детальных моделей высот квазигеоида.

4.2.2. Развитие метода спутникового нивелирования

Метод спутникового нивелирования заключается в определении нормальных высот по данным ГНСС-измерений и моделям квазигеоида. Развитие метода с точностью геометрического нивелирования III и IV классов необходимо для контроля ГВО и достоверности современных вертикальных движений земной поверхности, а также для повышения точности передачи значений нормальных высот от исходных пунктов на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока.

В основе спутникового нивелирования лежит известное геометрическое соотношение

$$H^{\gamma} = H - \zeta, \quad (4)$$

где H^{γ} – нормальная высота, вычисляемая методом спутникового нивелирования; H – геодезическая высота, получаемая из обработки и уравнивания ГНСС-измерений; ζ – высота квазигеоида (геоида) над эллипсоидом, по данным модели гравитационного поля Земли.

При всей кажущейся простоте геометрической формулы ее применение в чистом виде не обеспечит точность нормальных высот, соответствующую точности всех компонент (ГНСС-измерений, геометрического нивелирования, моделей геоида). Причина этого – в систематических смещениях по каждой компоненте:

$$(H^{\gamma} + \delta H^{\gamma}) = (H + \delta H) - (\zeta + \delta \zeta), \quad (5)$$

где $\delta H^{\gamma}, \delta H, \delta \zeta$ – соответствующие систематические смещения [4, 52].

Систематическое смещение геодезических высот δH . Если принять, что геодезическая высота и модель квазигеоида относятся к одному и тому же эллипсоиду (для спутниковых методов – общеземному), то основная

причина систематического смещения δH – в ошибке положения исходного пункта спутниковой геодезической сети. Определение разностей высот между пунктами спутниковой сети свободно от δH . Кроме того, существуют смещения в геодезических высотах, обусловленные выбором разных общеземных эллипсоидов с разными размерами (например, эллипсоиды WGS-84, ПЗ-90 и ГСК-2011). Ограничение на точность спутникового нивелирования вносит СКП геодезических высот из уравнивания ГНСС-измерений.

Систематическое смещение нормальных высот δH^{γ} . Обусловлено в первую очередь различием начал отсчета высот. В России используется Балтийская система высот 1977 г. (БСВ-77), начало которой находится в единственной точке – нуль-пункт Кронштадского футштока. Начало БСВ-77 может не соответствовать теоретическому уровню поверхности, определенной заданием общеземного эллипсоида. Кроме рассмотренного глобального сдвига имеются локальные систематические сдвиги нивелирных высот, обусловленные тем, что пункты нивелирования относятся к разным опорным точкам, выполненным и уравненным в разное время, без учета геодинамики. Здесь также влияют СКП нормальных высот из уравнивания геометрического нивелирования.

Систематическое смещение высот квазигеоида $\delta \zeta$. Систематические отклонения высот квазигеоида, получаемых с помощью моделей гравитационного поля Земли, вызваны собственно погрешностями моделей, несогласованностью в параметрах Земли, а также с неучтенными локальными особенностями квазигеоида. Кроме того, есть различие квазигеоида и геоида, приводящее к разности ортометрических и нормальных высот.

При получении нормальных высот спутниковым нивелированием следует помнить о существовании указанных систематических смещений.

4.2.3. Глобальные модели геоида

Высота геоида над эллипсоидом – одна из характеристик гравитационного поля Земли. В Потсдаме (Германия) в институте наук о Земле ведутся разработки моделей гравитационного поля, которые представляются на сайте Международного центра моделей гравитационного поля ICGEM [55].

Исходными данными для моделирования являются результаты наземных гравиметрических измерений, спутниковой альтиметрии и космических градиентометрических миссий.

Модели могут быть представлены в виде коэффициентов разложения в ряд сферических функций или в уже вычисленных значениях трансформант ГПЗ в узлах регулярной сетки («сеточные» модели) (см. дисциплины «Теоретическая геодезия», «Физическая геодезия»). В последнем случае необходима интерполяция значений в заданную точку, но вычисление происходит гораздо быстрее, чем с использованием непосредственно формул с коэффициентами разложения.

На сайте ICGEM предоставлен свободный доступ к различным моделям гравитационного поля Земли, а также есть много полезной информации и возможностей, например, онлайн-калькулятор для вычисления трансформант гравитационного поля Земли, в том числе высот геоида в заданной точке либо на заданную территорию.

В любом современном ПО обработки ГНСС-измерений существует обновляемая база глобальных моделей геоида, и с подключением модели в проект можно получать вместе с геодезическими высотами (Height) и ортометрическими (Elevation).

Для территории России определение нормальных высот спутниковым нивелированием с подключением глобальных моделей происходит с меньшей точностью. Это обусловлено очень малым применением спутниковой альтиметрии (мало открытой водной поверхности морей и океанов), неравномерным покрытием гравиметрической съемкой (малообжитая, труднодоступная территория) и секретностью гравиметрических данных. В связи с этим актуальной задачей является построение, исследование и уточнение моделей геоида/квазигеоида на территории России.

Решение этой задачи может быть на основе комплексного использования данных ГНСС, геометрического нивелирования и гравиметрических измерений, что заложено в концепции построения ФАГС и ВГС.

Пункты ФАГС связаны с реперами нивелирования I класса и фундаментальными гравиметрическими определениями, а пункты ВГС – с реперами нивелирования II класса и относительными гравиметрическими измерениями. Равномерное покрытие страны пунктами ФАГС и ВГС,

обеспеченными точными координатами, нормальными высотами и гравиметрическими измерениями, дает измерительную основу для построения высокоточной модели квазигеоида для спутникового нивелирования.

В настоящее время в ПО обработки ГНСС-измерений можно уточнять глобальные модели геоида/квазигеоида на ограниченной территории (например, на территории локальной спутниковой геодезической сети), на основании известных нормальных и геодезических высот в ряде общих (узловых) точек. Иначе говоря, строить локальные модели квазигеоида, точность которых выше глобальных. Нормальные высоты с использованием таких моделей будут получаться с ошибками на уровне ошибок входных данных (нормальных и геодезических высот в узловых точках).

Подробнее о построении локальных моделей квазигеоида будет сказано в подразд. 5.3.

4.2.4. Мировая система высот

С развитием ГНСС-технологий и высокоточным определением положения точек в пространстве, прогрессом в моделировании гравитационного поля Земли появляются возможности установления мировой системы физических высот, основанной на новых принципах. В начале XXI в. доктор технических наук, сотрудник ЦНИИГАиК Г. В. Демьянов сформулировал новые принципы создания системы высот [40].

Основные положения Г. В. Демьянова по установлению единой системы высот заключаются в следующем. Единую систему отсчета высот определяет поверхность общего земного эллипсоида и нормальный потенциал U_0 на поверхности этого эллипсоида. В этом случае не постулируется равенство $H^\gamma = 0$ в исходном пункте, более того, исходные нивелирные пункты вообще отсутствуют. Систему нормальных высот определяет вся совокупность геодезических пунктов, в каждом из которых с высокой точностью определена геодезическая высота H – по спутниковым данным, нормальная высота H^γ – по результатам нивелирования, высота квазигеоида над эллипсоидом ζ – по гравиметрическим данным.

Реализовать систему высот, предлагаемую Г. В. Демьяновым, возможно на основе измерительных данных на пунктах ФАГС на территории РФ,

а в глобальном масштабе – на пунктах IGS. Для этого необходимо построение высокоточной модели квазигеоида.

В Глобальной службе геодезических наблюдений (Global Geodetic Observation Service, GGOS) одна из приоритетных задач – установление мировой системы высот IHRF (International Height Reference Frame) [54]. Здесь вертикальной координатой служат не высоты или превышения, а геопотенциальные числа относительно принятого значения гравитационного потенциала W_0 (разность потенциалов ΔW). Положения пунктов задаются в геоцентрической мировой системе ITRF, с учетом их вариаций во времени. Поправки за прилив не вводятся, все измерения и параметры относятся к среднему приливу.

Гравитационный потенциал на поверхности Земли может определяться с помощью глобальных моделей геоида, а также по высокоточным «локальным» моделям гравитационного поля, построенным по данным наземной, морской и аэрогравиметрической съемок, спутниковой альтиметрии, астрономо-геодезическим данным, нивелирования и высокоточной модели рельефа.

4.2.5. Хронометрическое нивелирование

Как было сказано выше, в основе определения физических высот лежит определение разностей потенциалов по данным комплекса геодезических измерений. Разность гравитационных потенциалов может быть непосредственно измерена. Здесь используется релятивистский эффект общей теории относительности – изменение хода часов при изменении гравитационного поля. Этот релятивистский эффект проявляется в изменении частоты атомных стандартов f при изменении гравитационного потенциала W (гравитационном смещении частоты)

$$\left(\frac{f_1 - f_2}{f_1} \right) = \frac{W_2 - W_1}{c^2}, \quad (6)$$

где c – скорость света.

По данным частотных измерений разность физических высот h может быть вычислена по формуле

$$h_1 - h_2 \approx \left(\frac{f_1 - f_2}{f_1} \right) \frac{c^2}{g_{\text{ср}}}. \quad (7)$$

Метод определения разностей физических высот по измерению гравитационного смещения высоты называется хронометрическим нивелированием.

Здесь необходимы очень точные атомные стандарты – для сантиметровой точности определения разности высот стабильность частоты на суточном интервале должна быть не хуже 10^{-18} . Технология сличения частот очень сложна, здесь используются разные методы – передача частоты по оптоволокну или по ГНСС-измерениям (метод Common View) и др. Чем выше стабильность частоты, тем чувствительнее стандарты к внешним факторам – гравитационным и иным.

Эксперименты по определению разностей гравитационных потенциалов по релятивистскому смещению частоты атомных стандартов выполняются в ряде лабораторий мира [33, 46, 47, 59].

Хронометрическое нивелирование может быть реализовано глобально через сеть квантовых футштоков (точные стандарты частоты плюс комплекс аппаратуры) как опорных для создания и поддержания единой мировой системы высот. Кроме того, данная технология в будущем даст возможность в реальном времени отслеживать изменения гравитационного поля по изменению частоты атомных стандартов, выделять аномальные значения и тем самым прогнозировать различные геодинамические явления.

На сайте Глобальной службы геодезических наблюдений GGOS [58] в разделе «Измерения» («Observations») есть раздел с информацией об оптических атомных часах и хронометрическом нивелировании, <https://ggos.org/item/optical-atomic-clocks/#learn-this>.

4.2.6. Дальнейшее развитие высотно-гравиметрического обеспечения

Развитие главной высотной основы в дальнейшем предполагается в следующих направлениях [22].

1. Создание нескольких исходных пунктов ГВО (вместо единственного Кронштадского футштока). На каждом исходном пункте определяются:

– геометрическая компонента – геоцентрические координаты (X, Y, Z) с оценкой точности;

– физическая компонента – потенциал силы тяжести W , вычисленный из решения геодезической краевой задачи.

При создании новых исходных пунктов их совмещают с постоянно действующими ГНСС-станциями (ФАГС или IGS) для непрерывного мониторинга положения, с пунктами нивелирных сетей I класса и гравиметрическими пунктами, реализующими международную земную гравиметрическую систему отсчета (ITGRF).

Исходные пункты и нивелирные сети I и II классов составляют главную высотную основу Российской Федерации.

2. Уравнивание нивелирной сети с несколькими опорными пунктами. Выполняется уравнивание всех нивелирных измерений за десятилетия.

3. Построение модели квазигеоида. Важной задачей совершенствования высотной основы является уточнение и построение непрерывной высокоточной модели высот квазигеоида на всю территорию РФ. Использование такой модели позволит реализовать спутниковое нивелирование с точностью на уровне II–III класса геометрического нивелирования.

4. Согласование с Мировой высотной основой IHRF. Выбираются опорные пункты, реализующие IHRF, на которых определяется потенциал силы тяжести W_{IHRF} , согласованный с Мировой высотной основой IHRF.

5. Развитие хронометрического нивелирования: создание сети квантовых футштоков для определения разностей потенциалов силы тяжести по релятивистскому смещению частоты атомных стандартов.

Вопросы и задания

1. В ПО обработки ГНСС-измерений после подключения глобальных моделей геоида присутствует систематическая разность вычисленных нормальных высот и нормальных высот из геометрического нивелирования. Почему такое происходит?

2. Что такое спутниковое нивелирование? Источники смещения по высоте в спутниковом нивелировании.

3. Зайти на сайт ICGEM, изучить список глобальных моделей геоида. Какие современные модели: самые новые/с наибольшей степенью разложения/с какими исходными данными получены?

4. Как сеть ФАГС и ВГС может использоваться для уточнения моделей квазигеоида?

5. Изучить литературу, на которую даны ссылки в подразд. 4.3. Сформулировать общие принципы создания мировой системы высот.

6. Общие принципы хронометрического нивелирования.

7. Направления развития государственного высотно-гравиметрического обеспечения.

5. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РОССИИ. ПРИНЦИПЫ ВЗАИМНОГО ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ

5.1. Государственные системы координат

5.1.1. Общие сведения

Теоретические основы систем координат, применяемых в геодезии, и вопросы преобразования между ними рассматривались в дисциплине «Системы координат» [2]. В настоящем пособии будет сделан краткий обзор современного состояния координатного обеспечения России, рассмотрены вопросы преобразования координат (особенно вертикальных), связанные с реализацией спутникового нивелирования.

При выполнении геодезических и картографических работ, землеустройстве, строительстве, решении различных прикладных задач, связанных с координатным обеспечением, очень важным для специалистов является знание систем координат, умение преобразовывать координаты пунктов в установленную заказчиком систему. Например, выполнение ГНСС-измерений выполняется в СК WGS-84, обработка результатов – в ITRF, а заказчик требует координаты в государственной ГСК-2011 или местной системе координат. При некорректном обращении с настройками систем координат результаты высокоточных ГНСС-измерений могут быть отягощены грубыми ошибками, возникшими при перевычислении координат.

К настоящему времени вышел ряд стандартов, регламентирующих системы координат и преобразования между ними, применяемые в России [12, 36].

Системы координат можно разделить на несколько групп:

– глобальная международная земная система координат ITRS (International Terrestrial Reference System), ее реализация Международная земная координатная основа ITRF** (International Terrestrial Reference

Frame, где ** – последние цифры года) и составляющие ITRF**, например, IGS**;

- системы координат глобальных навигационных спутниковых систем, например, WGS-84 (GPS), ПЗ-90 (ГЛОНАСС), GTRF (GALILEO), CGCS2000 («Бэйдоу»);

- государственные геоцентрические системы координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11;

- референчные системы координат СК-42 и СК-95;

- местные системы координат МСК.

Системы ITRS/ITRF, а также системы координат ГНСС подробно рассматривались в дисциплинах «Спутниковые системы и технологии позиционирования», «Применение глобальных спутниковых навигационных систем в геодезии и навигации». Краткую информацию можно найти в стандартах [12, 36], а также в [1]. Поэтому далее будут кратко рассмотрены государственные и местные системы координат России.

5.1.2. Референчные системы координат СК-42 и СК-95

Система координат СК-42 реализована координатами пунктов ГГС, определенными классическими наземными методами триангуляции, полигонометрии и трилатерации, с 1946 г. была введена на территории СССР как государственная система.

После создания спутниковыми методами космической и доплеровской геодезических сетей, КГС и ДГС, было выполнено совместное уравнивание ГГС, КГС и ДГС, в результате чего были уточнены координаты пунктов ГГС. В 2000 г. Правительством РФ была принята уточненная референчная система 1995 г. (СК-95) в качестве государственной.

Обе системы, СК-42 и СК-95, используют одни и те же исходные геодезические даты и параметры: референц-эллипсоид Красовского, начало в центре Круглого зала Пулковской обсерватории, картографическая проекция Гаусса – Крюгера с 6-градусными зонами. Но в СК-95 гораздо меньше искажений по сравнению с СК-42 [11].

За десятки лет геодезических работ собраны огромные массивы геодезических данных и картографических материалов в системах СК-42 и СК-

95, что является большой ценностью в геодезическом производстве.

Системы координат СК-42 и СК-95 действуют до 01.01.2021 [26], с этого срока их запрещается использовать при создании новых геопространственных данных. Но нет запрета на использование данных, созданных ранее в этих системах.

5.1.3. Государственные геоцентрические системы координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. «О единых государственных системах координат» с 01.01.2017 в России были приняты государственная система координат ГСК-2011 для выполнения геодезических и картографических работ и государственная система координат ПЗ-90.11 для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов ГЛОНАССС и решения навигационных задач.

ПЗ-90.11 [36] реализуется координатами пунктов КГС; уточнение системы было выполнено в 2011 г. с использованием большого объема высокоточных ГНСС-измерений с пунктов КГС и ряда пунктов сети IGS. «Параметры Земли 1990 года» и их версия ПЗ-90.11 являются системой геодезических параметров, включающей фундаментальные геодезические постоянные, параметры общеземного эллипсоида, параметры гравитационного поля Земли, геоцентрическую систему координат и параметры ее связи с другими системами координат.

ГСК-2011 реализуется через перечисленные выше геодезические сети новой структуры (ФАГС, ВГС и СГС-1). Построение системы координат ГСК-2011 выполнялось в рамках мероприятий Федеральной целевой программы ГЛОНАСС на период 2002–2011 гг. За создание и эксплуатацию пунктов ГГС отвечает Росреестр, Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных. Основные сведения о разработке и реализации ГСК-2011 приведены в ряде публикаций [8, 9, 39].

Система координат ГСК-2011 – геоцентрическая система, по ориентировке осей координат идентична международной земной системе координат ITRS (International Terrestrial Reference System):

- начало системы совпадает с центром масс Земли;
- ось Z направлена к условному земному полюсу;
- ось X направлена в точку пересечения плоскости экватора и начального меридиана, установленного Международным бюро времени ВИН;
- ось Y дополняет систему до правой.

ГСК-2011 отличается от предыдущих систем СК-42 и СК-95, используемых для геодезических работ, методами создания, точностью, представлением (пространственные геоцентрические прямоугольные координаты XYZ), а также наличием скоростей V_x, V_y, V_z пунктов ФАГС.

Введение скоростей смещения пунктов обосновано главным образом точностью координат на уровне 3–5 мм, когда становятся значимыми движения пунктов, связанные с глобальным движением тектонических плит и локальными геодинамическими эффектами. Кроме этого, необходимо учитывать скорости пунктов для согласования ГСК-2011 и разных реализаций ITRF**. Скорости смещения пунктов важны для метода точного точечного позиционирования PPP, предоставляющего результаты на среднюю эпоху ГНСС-измерений, а также при использовании онлайн-сервисов обработки ГНСС-измерений, поскольку в большинстве своем они также выводят результаты на среднюю эпоху ГНСС-измерений. Окончательные результаты координатных определений должны быть на единую эпоху государственной системы координат, для чего нужно учитывать скорости смещения. Одна из важных задач государственного координатного обеспечения – определение и уточнение координат и скоростей пунктов ФАГС [6, 20].

Можно сказать, что из-за наличия скоростей пунктов ФАГС – носителей координат ГСК-2011 – эта система является кинематической. Наличие скоростей и изменяющихся координат пунктов осложняет задачу связи кинематической ГСК-2011 со статическими системами координат, в которых положения точек не должны изменяться (СК-95, местные системы координат).

Большая часть территории России находится на Евразийской литосферной плите, где взаимное положение точек не изменяется, несмотря на вращение этой плиты. И здесь можно использовать ГСК-2011 с координатами пунктов на 2011.0 как статическую, однократно определив параметры перехода к местным системам координат.

Однако на востоке страны есть несколько литосферных плит – Северо-

Американская, Амурская и Охотская, где взаимное положение точек у границ литосферных плит изменяется со временем [17]. Здесь возникает задача пересчета координат на разные эпохи и преобразований координат на границах литосферных плит.

5.1.4. Местные системы координат

Местные системы координат устанавливаются на ограниченной территории, для проведения геодезических и топографических работ при инженерных изысканиях, строительстве, межевании земель, ведении кадастров и выполнении других специальных работ. Обязательное требование к МСК – обеспечение возможности перехода к государственной системе координат. Подробное описание установления местных систем координат приведено в [3].

Начало отсчета и ориентировка осей МСК смещены по отношению к началу отсчета и ориентировке осей государственной системы координат. Это делается с целью уменьшения расхождений величин, измеренных на местности и на крупномасштабном плане, а также для ухода от режимных ограничений.

Местные системы координат, как правило, создаются в трехградусных зонах проекции Гаусса – Крюгера на эллипсоид Красовского, и каждая МСК может иметь одну или несколько таких зон, в зависимости от размера охватываемой территории. Параметры местных систем координат и ключи перехода к государственной системе координат устанавливает Росреестр.

К местным системам координат относят систему координат 1963 г. (СК-63, отменена с 1987 г.), местные системы координат субъектов РФ (МСК-NN_42, МСК-NN_95, где NN – номер субъекта) и местные системы координат населенных пунктов.

Большинство используемых на территории России МСК, в том числе местные системы координат населенных пунктов, были созданы на основе СК-42, поэтому все погрешности и деформации этой системы были, соответственно, перенесены на МСК. Точность СК-42 и произведенных от нее МСК не соответствует современным методам спутниковых геодезических измерений.

Для повышения качества МСК в ряде субъектов РФ была выполнена их модернизация на основе СК-95 (в том числе для Новосибирской области), и точность модернизированных систем стала гораздо лучше. Несмотря на то что с 01.01.2021 СК-95 не является государственной системой координат, переход от ГСК-2011 к местным системам осуществляется по схеме ГСК-2011 – СК-95 – МСК, поскольку в основе МСК и СК-95 одни и те же эллипсоид и проекция.

Параметры перехода (ключи) между местной и государственной системой координат включают в себя [31]:

- 1) долготу L_{1M} осевого меридиана первой зоны, проходящей через начало местной системы координат. Она не совпадает со стандартным положением осевых меридианов в СК-42/95, выбирается с целью минимальных искажений на интересующей территории;
- 2) ширину координатных зон ΔL – 3 или 6 градусов;
- 3) количество зон k , в зависимости от размера территории;
- 4) координаты начала МСК в государственной системе координат – x_T, y_T ;
- 5) координаты начала МСК в местной системе координат – x_0, y_0 ;
- 6) угол поворота осей координат МСК в точке начала МСК – γ .
- 7) высоту поверхности относимости местной системы координат H .

Ключи перехода между ГСК и МСК хранятся в территориальных управлениях федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр) соответствующего субъекта.

Для МСК-NN субъектов РФ параметр γ есть величина сближения меридианов МСК-NN и ГСК, и при перевычислении координат не участвует. Параметр «Высота поверхности относимости местной системы координат H » имеет обычно нулевое значение.

Местные системы координат населенных пунктов охватывают, кроме самих населенных пунктов, любые другие локальные объекты экономической и хозяйственной деятельности (промышленные объекты, месторождения, рудники, заповедники, военные полигоны и т. д.). В отличие от МСК-NN субъектов РФ, здесь только одна координатная зона. В некоторых случаях параметры 6 и 7 имеют ненулевое значение и должны учитываться при преобразовании координат.

Вопросы и задания

1. Государственные системы координат России.
2. По каким признакам отличаются ГСК-2011 и ПЗ-90.11?
3. Как регламентировано использование СК-95 и СК-42 после 01.01.2021?
4. Почему при решении прикладных задач используют местные системы координат, а не геоцентрические?
5. Какие параметры перехода, в основном, используются при создании местных систем координат?
6. Где хранятся параметры перехода к местным системам координат?

5.2. Преобразование между различными системами координат

5.2.1. Преобразование между референцными и геоцентрическими системами координат

Преобразование между геодезическими системами координат подробно рассматривалось в дисциплине «Системы координат». Переход от одной координатной системы к другой выполняется двумя основными методами: Гельмерта (преобразование пространственных прямоугольных координат) или Молоденского (преобразование эллипсоидальных геодезических координат).

Параметры трансформирования между системами координат (семь параметров): вектор переноса начала координат $\delta\mathbf{R} = (\delta X, \delta Y, \delta Z)^T$, вектор малого вращения вокруг координатных осей $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$, масштабный параметр μ .

Преобразование пространственных прямоугольных координат из одной системы в другую выполняется по следующим формулам:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_B = (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 1 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A + \begin{pmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{pmatrix}.$$

При трансформировании эллипсоидальных координат кроме

указанных семи параметров необходимо также знать параметры эллипсоидов

в двух системах координат (большую полуось a , квадрат эксцентриситета e^2). Параметры трансформирования между системами отсчета, а алгоритмы преобразований координат публикуются в различных ГОСТ [12, 36]. Для корректного трансформирования высокоточных координатных основ (например, переходов от одной реализации ITRF к другой) используются не только перечисленные параметры, но и их скорости изменения, всего 14 [60]. Тогда пересчет параметров трансформирования с эпохи t_0 на эпоху t выполняется по следующим формулам:

$$\begin{cases} \delta X = \delta X(t_0) + \dot{\delta X} \cdot (t - t_0); \\ \delta Y = \delta Y(t_0) + \dot{\delta Y} \cdot (t - t_0); \\ \delta Z = \delta Z(t_0) + \dot{\delta Z} \cdot (t - t_0); \\ \mu = \mu(t_0) + \dot{\mu} \cdot (t - t_0); \\ \omega_x = \omega_x(t_0) + \dot{\omega}_x \cdot (t - t_0); \\ \omega_y = \omega_y(t_0) + \dot{\omega}_y \cdot (t - t_0); \\ \omega_z = \omega_z(t_0) + \dot{\omega}_z \cdot (t - t_0), \end{cases}$$

где точка над знаком символа означает производную по времени (то есть скорость параметра).

Параметры трансформирования между системами координат определяются по разностям пространственных прямоугольных координат точек XYZ , известных в двух системах. При решении этой задачи возникают две основные проблемы:

1) система уравнений, составленная для территории, не охватывающей весь земной шар, плохо обусловлена. Это значит, что даже небольшие ошибки в исходных данных (измерениях) приводят к большим погрешностям в определяемых параметрах (аналогия – геометрический фактор DOP в ГНСС-технологиях) и разнице в значениях глобальных параметров при использовании разных точек для их определения;

2) для строгого определения параметров между общеземной и референцной системами координат необходимо знать геодезические высоты H

в референцной системе, а известны только нормальные высоты H^{γ} . Для перехода от нормальных высот к геодезическим требуется знать высоты квазигеоида ζ над референц-эллипсоидом, сведения о которых практически недоступны.

Непосредственное преобразование координат с использованием опубликованных глобальных параметров имеет невысокую точность – до нескольких метров, если сравнивать результаты преобразования с известными значениями координат в контрольных точках. Это связано с тем, что с глобальными параметрами практически невозможно описать локальные деформации координатной основы в СК-42 или СК-95.

В [8] опубликованы параметры преобразования из геоцентрической системы координат ГСК-2011 в СК-95 (семь параметров, определенных по разностям координат узловых точек в двух системах) для всей территории России, а также для европейской, центральной и восточной частей страны, а также средние квадратические погрешности широты B и долготы L .

В табл. 9 приведены параметры преобразования между ГСК-2011 и СК-95, определенные с использованием 267 пунктов триангуляции [8].

Таблица 9

Параметры преобразования между системами координат ГСК-2011 и СК-95 [8]

Параметры	Россия	Части страны		
		Европейская	Центральная	Восточная
$\delta X, \text{ м}$	25,971	25,482	23,350	22,292
$\delta Y, \text{ м}$	–134,831	–134,856	–130,705	–134,018
$\delta Z, \text{ м}$	–80,701	–83,583	–81,080	–83,712
$\omega_X, ''$	0,139	0,071	0,008	0,073
$\omega_Y, ''$	0,038	0,030	–0,016	–0,082
$\omega_Z, ''$	–0,165	–0,229	–0,082	–0,089
$\mu \cdot 10^{-6}$	–0,194	0,214	–0,428	0,170
СКП определения широты, м		$\pm 0,16$	$\pm 0,20$	$\pm 0,34$

СКП определе- ния долготы, м		$\pm 0,16$	$\pm 0,20$	$\pm 0,34$
---------------------------------	--	------------	------------	------------

Следует отметить, что, несмотря на различие значений параметров трансформирования, СКП определения широты и долготы соответствуют точности исходных данных – координат в СК-95. Такие параметры трансформирования можно назвать согласующими для данной территории.

В [8] отмечается, что региональные параметры, уточненные на территориях отдельных регионов, могут обеспечить предельную точность преобразования координат на уровне 10–15 см.

В ПО обработки ГНСС-измерений, в базе данных менеджера систем координат задаются значения глобальных параметров трансформирования, но они также могут иметь различия в метрах для разных ПО и их также можно называть согласующими. Рекомендуется при обработке ГНСС-измерений использовать опубликованные в ГОСТ [12] параметры трансформирования и далее выполнять ограниченное уравнивание спутниковой геодезической сети в референцной системе координат (СК-95 или СК-42). Для выполнения этой процедуры необходимы ГНСС-измерения на пунктах – носителях координат в референцной системе (см. дисциплину «Спутниковые системы и технологии позиционирования» и [5]).

5.2.2. Уточнение преобразования координат на ограниченной территории

На ограниченной территории (30–60 км) может быть выполнено уточнение координат, преобразованных с глобальными опубликованными параметрами из общеземной системы в референцную. Такое уточнение в ПО обработки ГНСС-измерений, как правило, выполняется в референцной системе в координатах картографической проекции и называется калибровкой в плане, или локализацией. На рассматриваемой территории для нескольких точек (узловых) должны быть известны координаты в обеих системах. Как правило, при калибровке в плане определяются три параметра – два смещения по координатам dx , dy и малый разворот γ в горизонтальной плоскости. Вычисление параметров выполняется из решения системы уравнений вида

$$\begin{aligned} dx - \gamma \cdot y_{\text{РЕФ}} &= x_{\text{реф}} - x_{\text{РЕФ}}, \\ dy + \gamma \cdot x_{\text{РЕФ}} &= y_{\text{реф}} - y_{\text{РЕФ}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $x_{\text{РЕФ}}, y_{\text{РЕФ}}$ – координаты узловой точки в референцной системе, преобразованные с глобальными параметрами из общеземной системы координат; $x_{\text{реф}}, y_{\text{реф}}$ – известные координаты узловой точки в референцной системе (по результатам наземных координатных определений).

Примечание. Формулы (8) приведены к линейному виду при условии малого разворота координатных осей γ (доли угловых секунд). Применимы при рассмотрении координат в одной системе и картографической проекции.

С найденными параметрами калибровки в пределах рассматриваемой территории можно выполнять преобразование координат с точностью, соответствующей точности исходных данных.

5.2.3. Переход к местным системам координат

Поскольку с 01.01.2021 государственной системой координат является геоцентрическая ГСК-2011, а множество задач, связанных с использованием пространственных данных, решается в местных системах, рассмотрим порядок перехода к этим системам с параметрами (ключами) перехода [23].

1. Переход от прямоугольных пространственных координат XYZ в ГСК-2011 к XYZ в СК-95 с опубликованными параметрами трансформирования. На этом этапе теряется точность ГСК-2011, основанной на спутниковых методах координатных определений.

2. Преобразование XYZ в СК-95 в эллипсоидальные координаты B, L, H с параметрами эллипсоида Красовского.

3. Вычисление плоских прямоугольных координат x', y' в проекции Гаусса – Крюгера с осевым меридианом зоны МСК $L_{\text{МСК}}$ и координатами начала МСК в государственной системе координат x_r, y_r .

4. Учет координат начала МСК в местной системе координат x_0, y_0 – вычисление окончательных координат в МСК x, y .

5. Если разворот осей координат γ не равен нулю (например, в МСК населенных пунктов), то учет этого разворота.

6. Если высота поверхности относимости ΔH не равна нулю, исправление высот точек.

Переходы к местным системам координат предусмотрены в специализированных ПО, в ПО ГИС. Здесь исходными данными, как правило, являются плоские прямоугольные координаты x, y в СК-95 или СК-42. Поэтому в п. 2 алгоритма выше нужен переход от эллипсоидальных координат к плоским по известным формулам.

Параметры (ключи) перехода являются закрытой информацией и выдаются в отделениях Росреестра. Однако их можно определить, если на заданной территории есть несколько точек с известными координатами в СК-95 и МСК. Алгоритмы определения ключей перехода рассмотрены в [7, 45].

Вопросы и задания

1. Чем отличаются методы преобразования координат Гельмерта и Молоденского?

2. Минимальное количество точек с известными координатами в двух системах, необходимое для определения параметров трансформирования Гельмерта.

3. С помощью приложения ГОСТ «Системы координат» [12] найти параметры преобразования из СК-95 в ГСК-2011. Сравнить с данными табл. 9.

4. Глобальные параметры в табл. 9 отличаются на метры. Как объяснить, что при таких различиях преобразование координат происходит со средней квадратической погрешностью на уровне точности исходных данных?

5. Подходит ли система уравнений (8) для определения параметров трансформирования для координат в разных картографических проекциях? Ответ обосновать.

6. Сохраняется ли точность ГСК2011 при переходе к местным системам координат? Обосновать ответ.

7. Найти и изучить алгоритмы определения ключей перехода к местным системам координат, приведенные в [3, 31]. Какое минимальное количество точек необходимо для определения ключей перехода к местным системам координат?

5.3. Спутниковое нивелирование.

Построение моделей локального квазигеоида

Теоретические основы спутникового нивелирования были рассмотрены в подразд. 4.2.2. Получение нормальных высот по данным ГНСС-измерений и моделям квазигеоида – одна из актуальных задач современной геодезии. Как показано в подразд. 4.2.2, использование глобальных моделей геоида или квазигеоида сопровождается систематическими смещениями. Точность спутникового нивелирования на ограниченной территории можно повысить путем построения локальной модели квазигеоида или уточнения глобальной моделей геоида.

Исходные данные для построения моделей:

- 1) геодезические координаты B_i, L_i, H_i нескольких пунктов (узловых точек), полученные после уравнивания спутниковой геодезической сети;
- 2) нормальные высоты H_i^y узловых точек, полученные из геометрического нивелирования;
- 3) в качестве дополнительной информации могут использоваться аномалии сил тяжести Δg по результатам гравиметрических измерений и астрономические широта и долгота (ϕ, λ) и азимуты a^* (или отклонения отвесной линии ξ, η).

Требуется:

- 1) подобрать математическую модель, описывающую поверхность квазигеоида на данной территории;
- 2) определить параметры модели с оценкой точности;
- 3) с найденными параметрами вычислить нормальные высоты в произвольных точках на данной территории.

Математическая модель в общем виде может быть представлена выражением

$$Ax = \zeta, \quad (9)$$

где ζ – вектор высот квазигеоида в узловых точках, $\zeta_i = H_i - H_i^y$, $i = 1 \dots n$, n – количество узловых точек; x – вектор параметров модели; A – модель,

связывающая измерения и определяемые параметры (матрица коэффициентов).

Моделью локального квазигеоида в данном случае (геометрическое представление) является поверхность, его описывающая. Это может быть плоскость, часть эллипсоида, сложная поверхность, составленная из кусочных элементов, построенная с помощью сплайнов, вейвлетов и т. д.

Простой вид модели для ограниченной территории в несколько десятков км может быть записан в виде полиномов:

$$\sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^n a_{lm} (B_i - B_0)^l (L_i - L_0)^m = H_i - H_i^y, \quad i = 1, \dots, k, \quad (10)$$

где B_0, L_0 – координаты начальной точки на рассматриваемой территории; B_i, L_i, H_i – геодезические координаты узловых точек с известными нормальными высотами H_i^y ; k – количество узловых точек; n – степень полинома.

Система уравнений вида (10) может быть дополнена выражениями, содержащими в правой части уклонения отвесной линии:

$$\sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^n l \cdot a_{lm} (B_i - B_0)^{l-1} (L_i - L_0)^m = -\frac{\xi_i''}{\rho''} (M_i + H_i); \quad i = 1, \dots, k, \quad (11)$$

$$\sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^n m \cdot a_{lm} (B_i - B_0)^l (L_i - L_0)^{m-1} = -\frac{\eta_i''}{\rho''} (N_i + H_i) \cos B_i; \quad i = 1, \dots, k, \quad (12)$$

где M_i и N_i – радиусы кривизны меридиана и первого вертикала в узловой точке.

Геометрический смысл параметров модели квазигеоида: коэффициент a_{00} – высота квазигеоида над эллипсоидом в начальной точке, a_{10}, a_{01} характеризуют наклоны квазигеоида относительно эллипсоида в этой точке, в направлении меридиана и первого вертикала соответственно.

В коммерческих ПО обработки ГНСС-измерений предусматривается построение аналогичной (10) модели локального квазигеоида по известным геодезическим и нормальным высотам общих точек, но вместо эллипсоидальных координат здесь используются плановые плоские координаты в

некоторой проекции:

$$a_{00} + a_{10}(x_i - x_0) + a_{01}(y_i - y_0) = H_i - H_i^\gamma \quad i = 1, \dots, k, \quad (13)$$

где x_i, y_i – координаты узловой точки; x_0, y_0 – координаты начальной точки.

Параметры модели (13) имеют тот же самый геометрический смысл, что и для модели (10).

При подключении в проект модели геоида происходит ее уточнение, и в правой части системы уравнений будут разности нормальных высот $H_{\text{Геоид}(i)}^\gamma$, полученных по модели, и измеренных нормальных высот H_i^γ

$$a'_{00} + a'_{10}(x_i - x_0) + a'_{01}(y_i - y_0) = H_{\text{Геоид}(i)}^\gamma - H_i^\gamma. \quad (14)$$

Геометрический смысл параметров $a'_{00}, a'_{10}, a'_{01}$: это остаточный сдвиг по высоте и остаточные наклоны реального квазигеоида, определяемого измеренными нормальными высотами, относительно его модели.

При калибровке по высоте параметры модели находятся из решения системы уравнений (13) или (14) по методу наименьших квадратов, с оценкой точности. Далее, с использованием найденных параметров модели, можно получать нормальные высоты в точках с заданными координатами в пределах области аппроксимации.

Оценка качества построения модели локального квазигеоида выполняется по следующим показателям.

Средняя квадратическая погрешность единицы веса. Должна соответствовать погрешностям исходных данных – геодезических высот из обработки и уравнивания ГНСС-измерений и нормальных высот из геометрического нивелирования.

Невязки в узловых точках после решения системы уравнений и оценки параметров не должны превышать СКП единицы веса. Если присутствуют большие невязки в отдельных точках, следует проверить соответствующие исходные данные.

Невязки в контрольных точках с известными нормальными высотами, но не участвующие при построении локальной модели квазигеоида. Рекомендуется по возможности выбирать несколько контрольных точек как в

центре, так и на краю локальной области.

Если перечисленные контроли пройдены, то на данном участке можно в произвольных точках с координатами (B_i, L_i, H_i) определять нормальные высоты спутниковым нивелированием с точностью, соответствующей точности исходных данных как

$$H_i^{\gamma} = H_i - \zeta_i, \quad (15)$$

где ζ_i вычисляется в данной точке по модели локального квазигеоида, с найденными параметрами.

Важное примечание: координаты произвольных точек, где требуется вычислить нормальную высоту, должны быть в одной и той же системе отсчета, что и координаты узловых точек.

В лабораторном практикуме [4] предусмотрена работа по построению локальной модели квазигеоида по реальным данным ГНСС-измерений и геометрического нивелирования, с анализом результатов.

Подобные процедуры построения локальной модели квазигеоида или уточнения глобальных моделей имеются в наличии в других программных обеспечениях, но могут называться по-другому – например, в ПО Leica Geo Office такая утилита называется «Локализация по высоте».

Параметры модели локального квазигеоида могут передаваться вместе с дифференциальными поправками от базовых станций в режиме RTK, и в этом случае геодезисты могут в реальном времени получать нормальные высоты.

Вопросы и задания

1. Геометрический смысл трех параметров модели локального квазигеоида, представленных в подразделе, без подключения глобальной модели геоида и с ее подключением.

2. Минимальное количество точек с известными геодезическими и нормальными высотами для определения параметров модели локального квазигеоида в (13).

3. Как оценивается качество спутникового нивелирования?

4. Как можно определить уклонения отвесной линии по модели локального квазигеоида?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Государственная координатная и высотная основа реализует государственную систему координат и высот, является опорой для развития сетей сгущения для решения практических задач геодезии. В учебном пособии рассмотрены основные принципы создания государственной координатной основы, выполнен обзор современного состояния государственных геодезических, нивелирных и гравиметрических сетей, приведены основные сведения о государственных системах координат и высот и о преобразованиях между ними. После каждого подраздела приведены контрольные вопросы и задания, выполнение которых поможет лучше понять и усвоить учебный материал.

В тексте учебного пособия много ссылок на нормативные документы, регулирующих создание государственной координатной основы, актуальные к моменту подготовки издания. Желательно, чтобы выпускники умели обращаться с подобными документами, отслеживать изменения и появление новых инструкций, стандартов и т. п., как будущие специалисты и руководители на производстве.

В каждом разделе пособия перечисляются еще не решенные задачи и предполагаются пути их решения, а также перспективы дальнейшего развития координатной основы. Решением этих задач могут заниматься выпускники профиля «Геодезия» в дальнейшем – или на геодезическом производстве, или в магистратуре.

Например, при создании государственной координатной основы актуальными задачами являются:

- определение и уточнение координат и скоростей пунктов ФАГС;
- международное сотрудничество: включение пунктов спутниковых геодезических сетей в сеть международной ГНСС-службы IGS, а результатов геодезических измерений – в глобальную систему геодезических наблюдений GGOS;
- согласование ГСК-2011 с местными системами координат, с целью

сохранения высокой точности геоцентрической координатной основы;

- реализация определения высокоточных координат в МСК и нормальных высот в реальном времени в режиме RTK;

- определение стратегии перехода к местным системам координат в геодинамически активных районах Дальнего Востока, с сохранением высокой точности на длительных промежутках времени;

- разработка и создание отечественных онлайн-сервисов обработки ГНСС-измерений и преобразования координат;

- обновление структуры государственной геодезической сети с включением в нее пунктов колокации и дифференциальных геодезических станций;

- обновление государственной высотной основы;

- развитие новых методов реализации систем высот;

- построение моделей квазигеоида на всю Россию и так далее.

Некоторые основы для решения перечисленных задач содержатся в данном учебном пособии или в приведенных литературных источниках.

Автор надеется, что полученные знания и навыки пригодятся будущим специалистам в области геодезии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография в 2 т. Т. 1. – М. : Картгеоцентр, 2005. – 334 с.
2. Афонин К. Ф. Высшая геодезия. Системы координат и преобразования между ними : учеб.-метод. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2011. – 66 с.
3. Герасимов А. П., Назаров В. Г. Местные системы координат. – 2-е изд. – М. : Проспект, 2010. – 64 с.
4. Гиенко Е. Г. Современные геодезические методы создания государственной координатной основы : учеб.-метод. пособие для выполнения практических работ. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 65 с.
5. Гиенко Е. Г., Антонович К. М., Липатников Л. А. Применение глобальных спутниковых навигационных систем в геодезии и навигации : практикум. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – 101 с.
6. Гиенко Е. Г. Уточнение скоростей движения пунктов ФАГС по данным ГНСС-измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 248–256.
7. Глушков В. В., Насретдинов К. К., Шаравин А. А. Космическая геодезия: методы и перспективы развития. – М. : Национальная картографическая корпорация, 2002. – 448 с.
8. Горобец В. П. Определение связи между геоцентрической системой координат и СК-95 // Физическая геодезия : науч.-техн. сб. – М. : Научный мир, 2013. – С. 95–98.
9. Горобец В. П., Ефимов Г. Н., Столяров И. А. Опыт Российской Федерации по установлению Государственной системы координат 2011 года // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 24–37.
10. ГКИНП (ГНТА)–03-010-03. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – 231 с.
11. ГКИНП (ГНТА)–06-278-04. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95). – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – 88 с.

12. ГОСТ 32453–2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек // Межгосударственный стандарт. – Введ. 2018–07–01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 24 с.

13. ГОСТ Р 57373–2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1). – Введ. 2017–06–01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 11 с.

14. ГОСТ 57374–2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС). – Введ. 2017–06–01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 16 с.

15. ГОСТ 57372–2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты высокоточной геодезической сети (ВГС). – Введ. 2017–06–01. – М. : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

16. Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Вопросы построения государственной геоцентрической системы координат Российской Федерации // Геодезия и картография – 2011. – № 11. – С. 17–25.

17. Дорогова И. Е., Мелкова А. И. Сравнение существующих моделей движения Амурской литосферной плиты // // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 116–122.

18. Исторические материалы. Декрет об учреждении ВГУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cgkipd.ru/100-letie-vgu/history/> (дата обращения: 13.10.2023).

19. Карпик А. П., Липатников Л. А., Лагутина Е. К. О направлении развития опорной геодезической сети России как элемента единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24. – № 2. – С. 87–94.

20. Липатников Л. А. Проверка опубликованных значений скоростей пунктов ФАГС в новой государственной системе координат ГСК-2011 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар.

науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. – С. 86–91.

21. Национальный доклад для Международной ассоциации геодезии и Международного геодезического и геофизического союза 2015–2018 / Российская академия наук. – Москва, 2019. – 100 с.

22. Национальный доклад для Международной ассоциации геодезии и Международного геодезического и геофизического союза 2019–2022 / Российская академия наук. – Москва, 2023. – 69 с.

23. Обиденко В. И. Обработка результатов спутниковых измерений при создании и развитии государственных геодезических сетей в программном обеспечении LEICA Geo Office : учеб.-метод. пособие. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 140 с.

24. Обиденко В. И., Оприцова О. А., Решетов А. П. Разработка методики получения нормальных высот на территории Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 14–25.

25. Об охранных зонах пунктов государственной геодезической сети, государственной нивелирной сети и государственной гравиметрической сети [Электронный ресурс] : Постановление Правительства Российской Федерации от 21.08.2019 № 1080. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

26. Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы [Электронный ресурс] : Постановление Правительства РФ от 24.11.2016 № 1240. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

27. Об установлении структуры государственной нивелирной сети и требований к созданию государственной нивелирной сети, включая требования к нивелирным пунктам [Электронный ресурс] : Приказ Министерства экономического развития от 29.03.2017 № 137. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

28. Об установлении структуры государственной геодезической сети и требований к созданию государственной геодезической сети, включая требования к геодезическим пунктам [Электронный ресурс] : Приказ

Росреестра от 19.09.2022 № П/0344. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

29. Об установлении требований к программным и техническим средствам, используемым при создании сетей дифференциальных геодезических станций [Электронный ресурс] : Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 02.09.2020 № П/0322. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

30. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных» (с изменениями на 25 августа 2023 года) [Электронный ресурс] : Постановление Правительства Российской Федерации от 01.12.2021 № 2148. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

31. Об утверждении порядка установления местных систем координат [Электронный ресурс] : Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 20.10.2020 № П/0387. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

32. О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 30.12.2015 № 431-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

33. Определение разности потенциалов силы тяжести и высот в геодезии посредством гравиметрических и спутниковых измерений / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, Д. Н. Голдобин, И. Г. Ганагина, Е. Г. Гиенко, Н. С. Косарев // Вестник СГУГиТ, вып. 3(31), 2015. – С. 53–69.

34. Основные положения о государственной геодезической сети России. – М. : ЦНИИГАиК, 2004. – 29 с.

35. Памятка: как выглядят геодезические пункты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosreestr.gov.ru/upload/to/sankt-peterburg/2019/ogk/ПАМЯТКА%20как%20выглядят%20геодезические%20пункты.pdf> (дата обращения: 13.10.2023).

36. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ. Военно-топографическое управление Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации. – М., 2014. – 52 с.

37. Пеллинен Л. П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия). – М. : Недра, 1978. – 264 с.

38. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF / В. С. Вдовин, В. В. Дворкин, А. П. Карпик, Л. А. Липатников, С. Д. Сорокин, Г. М. Стеблов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 6–27.

39. Результаты построения государственной геоцентрической системы координат Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геодезия и картография. – 2012. – № 2. – С. 53–57.

40. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Высотное и гравиметрическое обеспечение / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геопрофи. – 2014. – № 1. – С. 5–11.

41. Высокоточное спутниковое нивелирование и исследование локальной модели высот квазигеоида на территории России / Солодовник А. И., Шурьгин Д. Н., Литовченко Т. В., Николаева Д. М., Николаева А. М. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 12. – С. 109–114.

42. Список пунктов высокоточной геодезической сети [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cgkipd.ru/opendata/spisok-punktov-vysokotochnoy-geodezicheskoy-seti-vgs/>.

43. Сурнин Ю. В. О применении в геодезической практике России международной терминологии к понятиям «система координат» и «координатная основа» // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 3. – С. 28–36.

44. Телеганов Н. А., Елагин А. В. Высшая геодезия и основы координатно-временных систем. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 238 с.

45. Тревого И. С., Шевчук П. М. Городская полигонометрия. – М. : Недра, 1986. – 200 с.

46. Фатеев В. Ф., Рыбаков Е. А. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах // Доклады Российской академии наук. Физика. – 2021. – Т. 496. – С. 41–44.

47. Фатеев В. Ф., Колмогоров О. В. Определение разности гравитационных потенциалов в поле Земли на основе измерения гравитационной задержки световых волн в оптическом волокне // Измерительная техника. – 2023. – № 9. – С. 33–39.
48. Федеральный портал пространственных данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://portal.fppd.cgkipd.ru/main>. (дата обращения 13.10.2023).
49. Ходаков П. А., Басманов А. В. Состояние главной высотной основы Российской Федерации с учетом результатов выполненных объемов геометрического нивелирования в 2012–2018 гг. // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 5. – С. 12–22.
50. Центр точных эфемерид [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.rgs-center.ru (дата обращения: 15.10.2023).
51. Шендрик Н. К. Формирование локальной цифровой модели высот геоида на территорию Новосибирской области // Вестник СГУГиТ, 2016. – Вып. 4 (36). – С. 66–72.
52. Эволюция системы государственного геодезического обеспечения России : монография / А. П. Карпик, Е. М. Мазурова, И. Г. Ганагина, Е. Г. Гиенко. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 184 с.
53. CORS Guidelines, Guidelines for Establishing and Operating CORS // NOAA Foundation CORS Network, August 2020 [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.ngs.noaa.gov/CORS/Establish_Operate_CORS.shtml.
54. Ihde J. et al.: Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRs). Surv. Geophy 38(3), 549-570, 10.1007/s10712-017-9409-3, 2017.
55. International Center for Global Earth Models [Electronic resource]. – Mode of access: <http://icgem.gfz-potsdam.de/home/>.
56. International Terrestrial Reference System (ITRS) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://itrf.ign.fr/en/homepage>.
57. ITRF2020 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2020/description/more>.
58. Global Geodetic Observation Service, GGOS [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ggos.org/>.

59. Kopeikin S. M. et al. Chronometric measurement of orthometric height differences by means of atomic clocks // Gravitation and Cosmology. – 2016. – T. 22. – P. 234–244.

60. Petit G., Luzum B. IERS Conventions (2010). – 2010.

МЕНЮ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПОРТАЛА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ




portal.fppd.cgkipd.ru

ФППД – Федеральный портал пространственных данных







 Меню портала



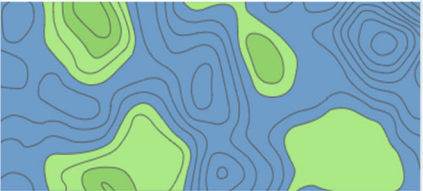

Версия для слабовидящих

РУС
 

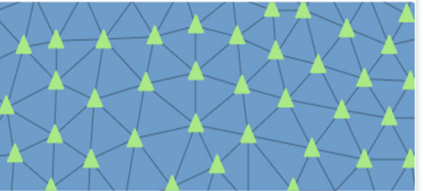
Личный кабинет



Сведения Единой электронной картографической основы (ЕЭКО)



Картографические материалы, ортофотопланы, материалы дистанционного зондирования Земли

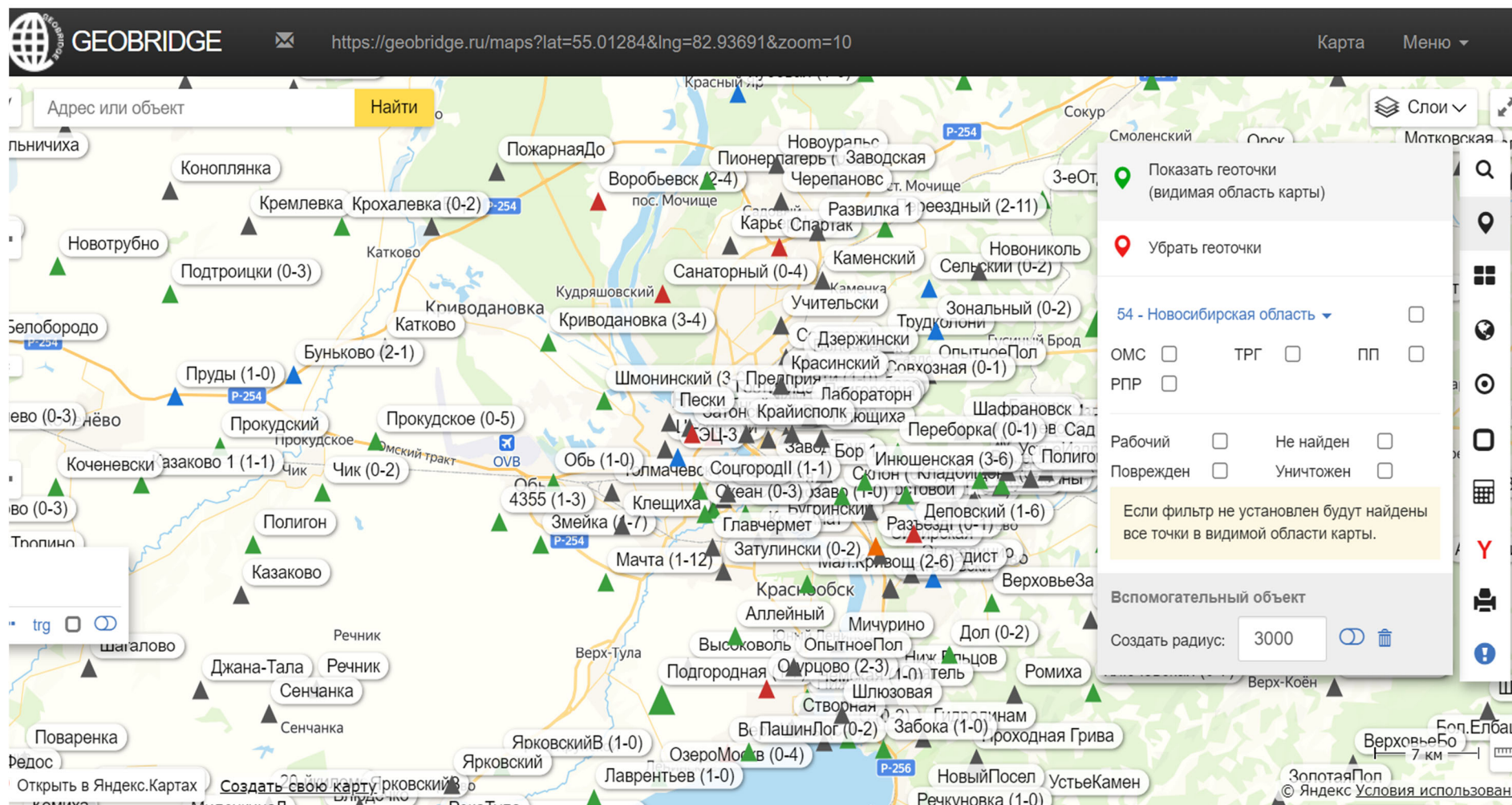


Сведения о пунктах государственной, нивелирной, гравиметрической сетей, геодезических сетей специального назначения



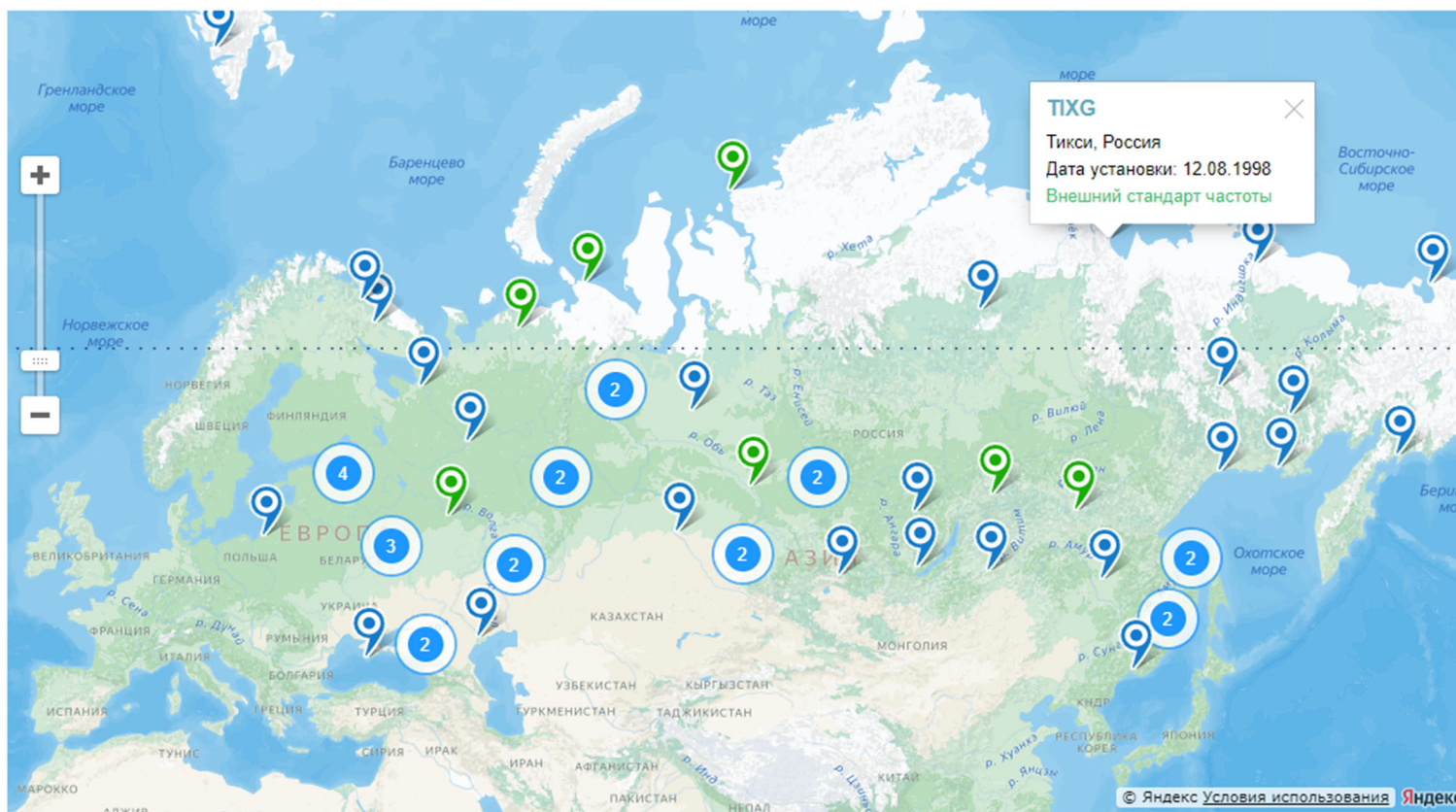
Пространственные данные и материалы иных фондодержателей и юридических лиц

КАРТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПУНКТОВ (САЙТ GEOBRIDGE)



КАРТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩИХ ПУНКТОВ ФАГС НА 18.10.2023 (САЙТ RGS-CENTER)

Карта пунктов ФАГС



СТРАНИЦА САЙТА RGS-CENTER ДЛЯ СКАЧИВАНИЯ RINEX-ФАЙЛОВ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ НА ПУНКТАХ ФАГС



[↓ RINEX](#)
[↓ SP3](#)
[📖 Карта пунктов ФАГС](#)
[📍 Координаты пунктов ФАГС](#)
[➔ Вход](#)

Фильтр ▾

Тип

Все файлы
 O: Файл измерений
 D: Hatanaka сжатый файл измерений
 N: Навигационный файл GPS
 G: Навигационный файл GLONASS
 L: Навигационный файл GALILEO
 F: Навигационный файл BeiDou
 Q: Навигационный файл QZSS
 M: Файл метеорологических данных

Станции

Все
 AMDR
 ANDR
 ARKH
 AST3
 BARE
 BELG
 BORO
 CHIT
 CHSD

Год от

2023

День от

291

Год до

2023

День до

291

🔍 [Выбрать](#)

The map displays the distribution of COVID-19 cases across Europe and Asia. The color scale ranges from green (low cases) to red (high cases). The numbers on the map represent the total number of cases in each country. The map includes labels for various countries in Latin and Cyrillic, as well as major cities. A legend in the top left corner shows the color scale and a zoom control.

Country	Cases
Finland	2
Sweden	6
Denmark	2
Norway	2
Poland	26
Czechia	21
Slovakia	23
Hungary	21
Romania	131
Bulgaria	109
Greece	73
Italy	99
Spain	131
France	70
Germany	32
Ukraine	4
Belarus	8
Kazakhstan	31
Albania	18
Serbia	38
Croatia	12
Slovenia	4
Montenegro	12
Moldova	2
Uzbekistan	2
Kyrgyzstan	2
Tajikistan	2
Turkmenistan	2
Azerbaijan	2
Georgia	2
Armenia	2
Yemen	2
Saudi Arabia	2
UAE	2
Qatar	2
Kuwait	2
Oman	2
Bahrain	2
Singapore	2
Malaysia	2
Indonesia	2
Philippines	2
Vietnam	2
Thailand	2
Myanmar	2
Laos	2
Cambodia	2
Brunei	2
Sri Lanka	2
Maldives	2
Bhutan	2
Nepal	2
Bangladesh	2
India	2
Pakistan	2
Afghanistan	2
Iran	2
Turkey	2
Syria	2
Lebanon	2
Israel	2
Jordan	2
Saudi Arabia	2
UAE	2
Qatar	2
Kuwait	2
Oman	2
Bahrain	2
Singapore	2
Malaysia	2
Indonesia	2
Philippines	2
Vietnam	2
Thailand	2
Myanmar	2
Laos	2
Cambodia	2
Brunei	2
Sri Lanka	2
Maldives	2
Bhutan	2
Nepal	2
Bangladesh	2
India	2
Pakistan	2
Afghanistan	2
Iran	2
Turkey	2
Syria	2
Lebanon	2
Israel	2
Jordan	2
Saudi Arabia	2
UAE	2
Qatar	2
Kuwait	2
Oman	2
Bahrain	2
Singapore	2
Malaysia	2
Indonesia	2
Philippines	2
Vietnam	2
Thailand	2
Myanmar	2
Laos	2
Cambodia	2
Brunei	2
Sri Lanka	2
Maldives	2
Bhutan	2
Nepal	2
Bangladesh	2
India	2
Pakistan	2
Afghanistan	2
Iran	2
Turkey	2
Syria	2
Lebanon	2
Israel	2
Jordan	2
Saudi Arabia	2
UAE	2
Qatar	2
Kuwait	2
Oman	2
Bahrain	2
Singapore	2
Malaysia	2
Indonesia	2
Philippines	2
Vietnam	2
Thailand	2
Myanmar	2
Laos	2
Cambodia	2
Brunei	2
Sri Lanka	2
Maldives	2
Bhutan	2
Nepal	2
Bangladesh	2
India	2
Pakistan	2
Afghanistan	2
Iran	2
Turkey	2
Syria	2
Lebanon	2
Israel	2
Jordan	2
Saudi Arabia	2
UAE	2
Qatar	2
Kuwait	2
Oman	2
Bahrain	2
Singapore	2
Malaysia	2
Indonesia	2
Philippines	2
Vietnam	2
Thailand	2
Myanmar	2
Laos	2
Cambodia	2
Brunei	2
Sri Lanka	2
Maldives	2
Bhutan	2
Nepal	2
Bangladesh	2
India	2
Pakistan	2
Afghanistan	2
Iran	2

СКРИНШОТ СТРАНИЦЫ ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЕТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ СО СВЕДЕНИЯМИ О СТАНЦИЯХ И ИХ ОПЕРАТОРАХ



Росреестр
Федеральная служба
подписки, регистрации,
кадастра и картографии

?
RU
ВОЙТИ

Операторы
Станции

Станции

Поиск

Стабильность

Статус

Субъект РФ

Оператор

Поверена

Только опорные

Станция	Субъект РФ	Адрес	Статус	Поверена	Оператор
01KR	Адыгея		Действующая	Поверена	ГСИ
01MA	Адыгея		Действующая	Поверена	ГСИ
0201	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0202	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0203	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0204	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0206	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0208	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0209	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0210	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0211	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ
0212	Башкортостан		Действующая	Поверена	АО ТНЦ РБ

Операторы

СПИСОК

Поиск

Субъект РФ

Оператор	Субъект РФ	Доступность	Телефон	Электронная почта	Стр
International GNSS Service (IGS)		Недоступен			99
ГБУ Московской области "МОБТИ"		Недоступен			10
ПАО "Татнефть"		Недоступен	+7 (495) 937-55-78	tatneft@tatneft.co.ru	15
АУ «ЦИТ» Минцифры Чувашии		Недоступен	8 8352 56 54 96	cit_geo@cap.ru	7
АО "Терминал-Рощино"		Доступен	8-3452-500-336	info@ggs72.ru	24
ГБУ ПК Центр технической инвентаризации и кадастровой оценки Пермского края		Недоступен	+7 (342) 241-26-07	info@ctipk.ru	11
ОГУП "Липецкоблтехинвентаризация"		Недоступен	+7 4742 24-33-88	wal@bti48.ru	1
ГБУ города Москвы «Московский городской трест геолого-геодезических и картографических работ» (ГБУ)		Доступен	+7 (499) 257-09-11	info.mggt@mos.ru	21

Строк на странице 15
1-15 из 22

15

02

28

11

500 KM

1 : 11 952 417

Учебное издание

Гиенко Елена Геннадьевна

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ

Редактор *О. В. Георгиевская*

Компьютерная верстка *Ю. С. Мерзликиной*

Дизайн обложки *А. А. Пантелеев*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 12.02.2024. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 6,04. Тираж 96 экз. Заказ 7.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.