

Е. Г. Гиенко

**СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ
КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ**

**Новосибирск
СГГА
2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Е. Г. Гиенко

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ

Утверждено редакционно-издательским советом академии в качестве
сборника описаний практических работ для студентов, обучающихся по
направлению подготовки бакалавров 120100.62 «Геодезия и дистанционное
зондирование» профиля «Космическая геодезия и навигация»

Новосибирск
СГГА
2014

УДК 528
Г465

Рецензенты: доктор технических наук, профессор СГГА *К. М. Антонович*
кандидат технических наук, начальник сектора траекторных
измерений Сибирского НИИ метрологии *В. М. Тиссен*

Гиенко, Е. Г.

Г465 Современные геодезические методы создания государственной
координатной основы [Текст] : сборник описаний практических работ /
Е. Г. Гиенко. – Новосибирск: СГГА, 2014. – 68 с.

ISBN 978-5-87693-772-8

Сборник описаний практических работ подготовлен кандидатом технических наук, доцентом Е. Г. Гиенко на кафедре физической геодезии и дистанционного зондирования Сибирской государственной геодезической академии.

Сборник составлен в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Современные геодезические методы создания государственной координатной основы» и предназначен для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 120100.62 «Геодезия и дистанционное зондирование» профиля «Космическая геодезия и навигация», а также может быть рекомендован магистрам направления подготовки 129100.68 «Геодезия и дистанционное зондирование» и аспирантам, обучающимся по специальности 25.00.32 «Геодезия». Издание содержит основные теоретические сведения, требования и рекомендации по выполнению практических работ.

Сборник рекомендован к изданию Ученым советом Института геодезии и менеджмента СГГА.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГГА

Ответственный редактор: кандидат технических наук, доцент, СГГА
И. Г. Ганагина

УДК 528

ISBN 978-5-87693-772-8

© ФГБОУ ВПО «СГГА», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Практическая работа № 1. Определение координат начального пункта спутниковой геодезической сети	9
Практическая работа № 2. Уравнивание локальных спутниковых геодезических сетей, построенных относительно геометрическим методом	21
Практическая работа № 3. Исследование точностных характеристик современных глобальных моделей гравитационного поля Земли.....	29
Практическая работа № 4. Определение параметров модели локального квазигеоида по спутниковым, нивелирным, астрономическим и гравиметрическим данным	41
Практическая работа № 5. Привязка локальной спутниковой геодезической сети к государственной плановой и высотной основе.....	47
Библиографический список	56
Приложение 1. Исходные данные для выполнения практической работы № 1	58
Приложение 2. Порядок получения информации с сайтов активных базовых станций и IGS.....	59
Приложение 3. Основные настройки проекта в ПО Trimble Business Center.....	60
Приложение 4. Порядок работы с утилитой Coordinate System Manager в ПО Trimble Business Center	61
Приложение 5. Исходные данные для выполнения практических работ № 3 и 4.....	62
Приложение 6. Астрономические и геодезические координаты пунктов спутниковой геодезической сети	67

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Современные геодезические методы создания государственной координатной основы» была включена в рабочий учебный план специальности «Космическая геодезия» с 2007 г. и перешла в учебный план для бакалавров 4-го курса специализации «Космическая геодезия и навигация». Инициатива введения этой дисциплины, как обобщающего курса для выпускников геодезических специальностей вуза, принадлежала профессору кафедры астрономии и гравиметрии СГГА, кандидату технических наук Ю. В. Сурнину. Им же была разработана первая рабочая программа дисциплины; совместно с ним обсуждались содержание и тематика практических работ.

Термин «*координатная основа*» означает материализацию системы координат; это есть некоторое ограниченное множество физических носителей координат и описание системы координат, включая математическое описание модели и ее числовые параметры [1].

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* [2].

Для организации высокоэффективной системы геодезического обеспечения необходимы реализация инновационной структуры государственных геодезических сетей, создание федеральной спутниковой дифференциальной сети и сервисов предоставления дифференциальной информации, модернизация государственной высотной основы и решение ряда других задач, перечисленных в Концепции развития отрасли геодезии и картографии РФ до 2020 г. [2].

С развитием спутниковых методов и технологий позиционирования в геодезии, геодинاميке и топографии существенно изменяются роль и функциональные требования к государственной инфраструктуре геодезических измерений – государственным системам координат и геодезиче-

ским сетям. В Основных положениях о государственной геодезической сети Российской Федерации [3] рассмотрена современная структура государственных геодезических сетей (ГГС): фундаментальная астрономогеодезическая сеть (ФАГС), высокоточная геодезическая сеть (ВГС), спутниковая геодезическая сеть 1-го класса (СГС1). Указанные сети заменяют существующую геодезическую сеть 1–4-го класса, созданную наземными традиционными геодезическими методами. Одной из актуальных задач в современной геодезии является корректная вставка локальных спутниковых геодезических сетей (СГС) в существующую ГГС (см. практические работы № 1, 2 и 5).

Немаловажным для решения задач высокоточного координатно-временного обеспечения является создание и распространение геодезических сетей постоянно действующих базовых станций глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Необходимость создания и развития федеральной спутниковой дифференциальной сети и сервисов предоставления дифференциальной информации как одного из сегментов функциональных дополнений системы ГЛОНАСС отмечена в Концепции. Современному выпускнику по направлению «Геодезия» необходимо обладать навыками работы с информацией, предоставляемой постоянно действующими базовыми станциями (см. практическую работу № 1).

Положения базовых станций ГНСС определяются с высокой точностью в общеземных системах координат (ПЗ-90, WGS-84, ITRF), в то время, как государственной системой координат Российской Федерации в настоящее время является референцная СК-95 [3]. Постановлением Правительства «О единых государственных системах координат» от 28 декабря 2012 г. [4] устанавливаются геоцентрические системы: ГСК-2011 для использования при осуществлении геодезических и картографических работ и ПЗ-90.11 для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач. Система геодезических координат СК-95, как и существовавшая ранее СК-42, применяются до 1 января 2017 г. в отношении материалов (документов), созданных с их использованием. В связи с введением новых систем координат становятся актуальными задачи корректного преобразования координат из одной системы в другую (см. практическую работу № 5).

Одной из задач Концепции [2] в области модернизации государственной высотной основы является изучение фигуры Земли и ее внешнего гравитационного поля, а также развитие спутникового нивелирования

(II–IV классов) с использованием гравиметрических данных. Современные специалисты в геодезии должны знать методы построения математических моделей гравитационного поля Земли (см. практическую работу № 3), применение этих моделей для спутникового нивелирования (см. практическую работу № 4).

Цель курса «Современные геодезические методы создания государственной координатной основы» состоит в получении студентами 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;

- получение цельного представления о взаимосвязи традиционных и современных спутниковых координатных определений (о взаимном трансформировании координат, полученных спутниковыми и классическими методами).

Студенты в результате изучения дисциплины должны *знать и уметь использовать*:

- методы современной геодезии для решения научных и практических задач;

- результаты деятельности международных организаций, связанных с науками о Земле (IGS, IERS, CDDIS, IAG и т. д.);

- данные, предоставляемые сервисными службами сетей активных базовых станций ГНСС.

Студенты должны *иметь навыки*:

- получения необходимых геодезических данных с использованием ресурсов Интернет;

- осознанного управления процедурами обработки ГНСС-измерений в коммерческом программном обеспечении;

- правильной интерпретации результатов, полученных как традиционными, так и спутниковыми методами геодезии.

Настоящий сборник предназначен для выполнения практических работ по дисциплине «Современные геодезические методы создания госу-

дарственной координатной основы». Практические работы представляют собой комплекс связанных между собой заданий, направленных на выполнение различных этапов *обработки ГНСС-измерений* при создании СГС, а также согласовании СГС с государственной координатной основой. Вопросы, касающиеся технологии собственно геодезических измерений (как ГНСС-, так и наземных), рассматриваются в предшествующих дисциплинах «Спутниковые системы и технологии позиционирования», «Технологии создания государственных геодезических сетей», а также при прохождении комплексной учебной практики. Для выполнения работ необходимы знания, полученные в результате освоения дисциплин «Высшая геодезия», «Космическая геодезия», «Современные проблемы физической геодезии». Поскольку студенты параллельно изучают дисциплину «Космическая навигация», то в сборнике предусмотрены ссылки на соответствующие практические работы этого курса.

При выполнении работ полагается, что студенты знакомы с основными функциями обработки ГНСС-измерений в коммерческом программном обеспечении (ПО). В сборнике предлагаются задачи по осознанной и расширенной настройке опций коммерческого ПО для получения наилучшего решения.

В ходе выполнения практических работ *следует*:

- определить характерные особенности современных геодезических методов создания государственной координатной основы;
- рассмотреть проблемы, возникающие при согласовании существующей государственной плановой и высотной основы с результатами спутниковых координатных определений, и изучить принципы их решения;
- изучить различные способы уравнивания спутниковых геодезических сетей и привязки их к государственной координатной основе;
- опробовать на практике способы определения аномалий высоты, отклонений отвеса, астрономических координат и азимутов с помощью спутниковых средств измерений и математической модели квазигеоида.

Все практические работы предполагают анализ результатов, выводы и рекомендации; в итоге студенты приобретают навыки как решения производственных задач, так и исследовательской работы – постановки экспериментов, правильной интерпретации получаемых результатов, выбора оптимального решения.

Исходными данными для выполнения работы являются производственные материалы, выдаваемые преподавателем или получаемые студентами самостоятельно с использованием ресурсов Интернет. Кроме того, для выполнения работ необходимы программное обеспечение обработки ГНСС-измерений и руководство пользователя применяемого ПО.

Все задания являются индивидуальными и выполняются по соответствующему варианту. По каждому заданию студент представляет оформленный отчет, который должен содержать:

- титульный лист с указанием названия учебного заведения и кафедры, года выполнения задания, номера и названия практической работы, номера варианта, группы и фамилии студента, а также ведущего преподавателя;
- исходные данные к работе в соответствии с номером варианта;
- описание разделов работы, полученные результаты, заполненные таблицы, пояснения к ним;
- выводы и рекомендации по работе или заключение.

Работы оформляются в текстовом редакторе Word, сдаются на проверку преподавателю. После исправления замечаний выполняется защита работ в виде ответов на вопросы (примерные списки вопросов приведены в конце каждой практической работы).

Автор выражает благодарность профессору СГГА Ю. В. Сурнину за внимательное обсуждение работы и ценные замечания.

Практическая работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ НАЧАЛЬНОГО ПУНКТА СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ

Бюджет времени: 6 часов аудиторных занятий и 6 часов самостоятельной работы.

Цель и задачи работы: получение координат начального пункта СГС, знакомство с деятельностью IGS, обучение самостоятельному использованию интернет-ресурсов для получения координат начального пункта СГС, освоение методики обработки ГНСС-измерений, сравнение способов получения координат начального пункта, выбор из них оптимального.

Исходные данные:

- файл ГНСС-измерений на начальном пункте спутниковой геодезической сети;

- руководство пользователя ПО TBC [6].

Дата наблюдения, идентификаторы пунктов IGS или постоянно действующих базовых станций локальной СГС выдаются преподавателем по варианту (прил. 1). Для указанных данных следует, пользуясь ресурсами Интернет, подготовить файлы точных эфемерид, файлы измерений на постоянно действующих базовых станциях, информацию о станциях и их геоцентрические координаты.

Для выполнения работы, составления отчета и ответов на контрольные вопросы рекомендуется ознакомиться с соответствующими разделами изданий [5, 7, 8, 9].

Общие теоретические сведения

Особенностью высокоточных координатных определений с использованием ГНСС-технологий является применение относительного метода космической геодезии. В результате обработки результатов одновременных наблюдений на двух пунктах относительным методом получается вектор базовой линии. Базовая линия есть основной элемент для построения геодезических сетей по ГНСС-наблюдениям.

Поскольку компоненты векторов базовых линий – разности координат пунктов СГС, то, чтобы получить непосредственно положения пунктов, необходимо знать координаты как минимум одной, начальной, станции. В этом случае, при фиксировании координат этой станции и выполнении минимально ограниченного уравнивания СГС в ПО обработки ГНСС-измерений вычисляются координаты остальных пунктов относительно начального. Имеющиеся погрешности координат начального пункта напрямую скажутся на погрешностях остальных пунктов спутниковой геодезической сети. Кроме того, погрешности в координатах начала базовой линии влияют на решение базовой линии в целом (вносятся погрешности в коэффициенты и свободные члены уравнений поправок).

Определение координат начального пункта СГС можно выполнить несколькими способами, такими, как:

- перевычисление координат пункта государственной геодезической сети из СК-95 в общеземную систему координат с глобальными параметрами перехода (погрешность перевычисления 5–10 м);
- использование ГНСС-навигатора (определение положения с погрешностью 5–10 м);
- продолжительные сеансы наблюдений (до нескольких суток), вычисление координат из навигационного решения (дециметровая точность);
- передача координат относительным методом от пунктов с точными известными положениями в общеземной системе (сантиметровая точность).

В геодезическом производстве, как правило, используются последние два способа, и одной из задач настоящей практической работы является их сравнение.

Передача координат на начальный пункт спутниковой геодезической сети может быть выполнена наилучшим образом от постоянно действующих базовых станций [5], положения которых в общеземной системе (ITRF, WGS-84, ПЗ-90, ГСК-2011 [1]) известны с высокой точностью. Это могут быть как локальные, региональные сети постоянно действующих базовых станций, так и международная сеть пунктов МГС (международная ГНСС-служба, IGS).

Координаты и скорости станций МГС в системе ITRF, а также файлы «сырых» измерений в RINEX-формате доступны по сети Интернет. Кроме того, одним из результатов деятельности МГС являются *точные эфемериды спутников*, также доступные по сети Интернет.

При подготовке исходных данных для выполнения работы студенты знакомятся со следующими интернет-ресурсами:

- сайт Международной ГНСС-службы, <http://igscb.jpl.nasa.gov>;
- сайт Международной земной системы отсчета ITRF, <http://itrf.ign.fr/>;
- сайты активных базовых станций.

Обработка данных выполняется в ПО Trimble Business Center (TBC). Подразумевается, что с основными процедурами обработки в TBC студенты ознакомлены после изучения дисциплин «Современные средства спутниковых наблюдений», «Спутниковые системы и технологии позиционирования», а также прохождения комплексной учебной практики.

Методика выполнения работы

1. Подготовка исходных данных

1.1. Точные эфемериды спутников ГНСС и интерактивный GPS-календарь

Точные эфемериды спутников – один из продуктов деятельности международной службы IGS. Точные эфемериды определяются также и в других научных центрах; в частности, в России функционирует Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП), ее официальный сайт <http://www.glonass-svoevp.ru/>.

Точные эфемериды находятся в открытом доступе; в ряде современных ПО обработки ГНСС-измерений (например, в Pinnacle) есть встроенная процедура для загрузки точных эфемерид в проект. Один из вариантов простого и быстрого получения файлов эфемерид – использование интерактивного GPS-календаря.

Для подготовки данных следует, пользуясь интерактивным GPS-календарем (например, www.rvdi.com/freebies/gpscalendar.html), выписать на дату варианта:

- день от начала года **DDD**,
- номер GPS-недели **nnnn**,
- день недели **d** (**0** – вс, **1** – пн, и т. д.).

День от начала года понадобится для нахождения файла «сырых» измерений на постоянно действующих станциях. Комбинация «номер GPS-недели и день недели» определяет имя файла точных эфемерид **igsnnnnnd.sp3**; где **igs** – название организации, выпускающей эфемеридный файл.

В задании необходимо, используя интерактивный GPS-календарь, скачать точные эфемериды спутников GPS, ГЛОНАСС (окончательные, Final Orbits) на дату варианта, предыдущую и последующую даты. Смежные даты необходимы для исключения случаев несинхронности часов на станциях (например, суточный файл измерений мог начаться на секунду раньше, чем приведена соответствующая эфемеридная информация). Кроме того, привлечение эфемерид на смежные даты позволяет выполнять более точное интерполирование данных на границах временного интервала.

По окончании выполнения пункта 1.1 заполнить табл. 1.1.

Таблица 1.1

Файлы точных эфемерид

День от начала года:	Номер GPS-недели:	День недели:
Дата	Имя файла точных эфемерид	
Предыдущая дата		
Дата варианта		
Последующая дата		

1.2. Файлы ГНСС-измерений

Для выполнения работы следует получить файлы ГНСС-измерений на пунктах IGS и на определяемом пункте в RINEX-формате, по три файла для каждого пункта спутниковой геодезической сети:

- *.ggo – файл измерений;
- *.ggn – навигационное сообщение GPS;
- *.ggg – навигационное сообщение ГЛОНАСС.

Здесь первые две буквы после точки – последние цифры года, третья буква определяет тип файла.

Файлы ГНСС-измерений на пунктах IGS. Ознакомиться с официальным сайтом IGS (<http://igscb.jpl.nasa.gov>).

Файлы измерений хранятся на нескольких серверах; в том числе, на сайте CDDIS (Crystal Dynamics Data Information System, информационная система данных динамики земной коры, USA), <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/data/daily/>.

После вызова ссылки следует выбрать последовательно год, день от начала года, вид Rinex-файла (измерений, навигационного сообщения GPS и ГЛОНАСС), название станции.

Файлы ГНСС-измерений на определяемом пункте. Ознакомиться с официальным сайтом активной спутниковой сети, к которой принадлежит пункт по варианту задания и с инструкцией по получению файлов измерений для постобработки. Скачать суточный файл ГНСС-измерений на дату варианта в RINEX-формате. Порядок действий приведен в прил. 2.

По окончании выполнения пункта 1.2 заполнить табл. 1.2.

Таблица 1.2

Имена файлов ГНСС-измерений в RINEX-формате

Пункт	Имя файла		
	Измерения	Навигационное сообщение GPS	Навигационное сообщение ГЛОНАСС

1.3. Координаты пунктов IGS в системе координат ITRF

Ознакомиться с официальным сайтом ITRF <http://itrf.ign.fr/>, выписать прямоугольные координаты станций (X , Y , Z) в системе ITRF-2013, а также на дату варианта.

Для получения координат пунктов ITRF на эпоху каталога 2013 г. перейти по ссылке http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2008/doc/ITRF2008_GNSS.SSC.txt, из таблицы выписать координаты, скорости и их погрешности для пунктов своего варианта.

Получение координат пунктов с сайта ITRF на дату наблюдения выполняется в порядке, приведенном в прил. 2.

Результаты получения координат и скоростей пунктов IGS занести в табл. 1.3.

Совершить переход от пространственных прямоугольных координат пунктов X , Y , Z к геодезическим эллипсоидальным в геоцентрической системе координат с параметрами эллипсоида WGS-84 по формулам:

$$L = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X}; \quad B_0 = \operatorname{arctg} \frac{Z}{r_p}; \quad B^{(i)} = \operatorname{arctg} \frac{Z + N^{(i-1)} e^2 \sin B^{(i-1)}}{r_p}; \quad (1.1)$$

$$H = \frac{Z}{\sin B} - N(1 - e^2); \quad N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}};$$

$$r_p = (X^2 + Y^2)^{1/2}, \quad a = 6\,378\,137 \text{ м}, \quad e^2 = 0,006\,694\,379\,990\,13. \quad (1.2)$$

Таблица 1.3

Координаты и скорости пунктов IGS

Пункт	Координаты, м	X	m_X	Y	m_Y	Z	m_Z
1	2013						
	Дата варианта						
2	2013						
	Дата варианта						
	Скорости, м/год	X'	$m_{X'}$	Y'	$m_{Y'}$	Z'	$m_{Z'}$
1	2013						
	Дата варианта						
2	2013						
	Дата варианта						

Результаты вычислений оформить в виде табл. 1.4.

Таблица 1.4

Эллипсоидальные координаты пунктов IGS

Пункт	Дата	$B, ^\circ ' ''$	$L, ^\circ ' ''$	$H, \text{м}$
1	2013			
	Дата варианта			
2	2013			
	Дата варианта			

1.4. Информация о ГНСС-измерениях на пунктах спутниковой геодезической сети

При обработке ГНСС-измерений важно знать тип спутниковой аппаратуры (антенны и приемника), а также высоту антенны и метод ее измерения.

Эту информацию для пунктов IGS можно найти на сайте IGS <http://igscb.jpl.nasa.gov>, перейдя на закладку **IGS Tracking Network – station list**. Здесь выбрать станцию в списке, выйти на ее описание, вызвав текстовый файл с расширением ***.log**. В этом файле следует найти необходимые сведения и записать их в табл. 1.5.

Сведения об измерениях на пунктах ПДБС Новосибирск содержатся в текстовом файле, прилагаемом к архиву ГНСС-измерений. Информация о пунктах других активных спутниковых сетей находится на соответствующих официальных сайтах.

Таблица 1.5

Сведения о выполнении ГНСС-измерений

Пункт	Тип приемника	Тип антенны	Высота антенны	Метод измерения высоты
1				
2				
3				

2. Обработка спутниковых измерений.**Создание и настройки проекта****2.1. Создание проекта, импорт файлов измерений и точных эфемерид в проект**

Перед выполнением работы необходимо разархивировать файлы ГНСС-измерений и точных эфемерид и поместить их в отдельную папку на компьютере.

Обработка спутниковых измерений может выполняться в любом предназначенном для этого программном обеспечении, например, в ПО Trimble Business Center. Обработка начинается с создания и настройки проекта, импорта файлов измерений и точных эфемерид в проект.

Основные настройки проекта в ПО ТВС перечислены в прил. 3.

Импорт файлов в проект выполняется стандартными процедурами; при этом необходимо проверить соответствие типов приемников и антенн, высот антенн и методов их измерений, указанных в табл. 1.5, и информации, отображаемой в окне процедуры импорта. При необходимости следует откорректировать информацию вручную.

Результаты выполнения пункта 2.1 отобразить в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Файлы измерений спутниковой геодезической сети

№ п/п	Идентификатор пункта	Имя файла	Дата измерений	Сеанс измерений		Внесенные изменения при импортировании файла
				начало	конец	

2.2. Формирование геодезической сети.

Навигационные координаты пунктов

После импорта измерений в окне программы отобразится спутниковая геодезическая сеть. Если загружены синхронные измерения, то пункты будут соединены векторами – базовыми линиями. *В отчете по работе привести схему сети с указанием масштаба.*

Выписать координаты пунктов (X, Y, Z), (B, L, H) спутниковой геодезической сети из навигационного решения. Для этого надо навести курсор на пункт, щелкнуть правой кнопкой мыши, вызвав контекстное меню, выбрать свойства. Выбрать значок $\oplus$. Заполнить табл. 1.7.

Таблица 1.7

Координаты пунктов СГС из навигационного решения

Идентификатор пункта	$B, ^\circ ' ''$	$L, ^\circ ' ''$	$H, \text{ м}$	$X, \text{ м}$	$Y, \text{ м}$	$Z, \text{ м}$

3. Предварительная обработка ГНСС-измерений

3.1. Обработка базовых линий

Перед началом обработки базовых линий следует настроить раздел проекта *Обработка базовых линий* (прил. 3). Запуск обработки в ПО ТВС выполняется через основное меню – *Съемка – Обработка базовых линий*. Начальные положения векторов базовых линий оставить из навигационного решения. Выполнить несколько вариантов обработки, изменяя настройки (например, маску по высоте). Выбрать наилучший вариант решения (фиксированный тип решения, с минимальными погрешностями, с максимальным числом Ratio (отношение дисперсий)). Результаты наилучшего решения занести в табл. 1.8. Просмотреть отчет по обработке базовых линий (из меню «Отчеты»).

Таблица 1.8

Характеристики базовых линий

№ п/п	Начало и конец вектора базовой линии	Длина базовой линии, м	Тип решения	Отношение дисперсий (Ratio)	Точность в плане, м	Точность по высоте, м	СКП единичного измерения (RMS), м

3.2. Внешний контроль решения базовых линий

В работе необходимо выполнить независимый контроль результатов решения базовых линий.

Вычисление невязок в замкнутой фигуре (полигоне). Выбрать в Меню *Съемка* опцию *Замыкание контура GNSS*. Из отчета записать сведения:

- длина полигона;
- невязка в плане;
- невязка по высоте;
- относительная погрешность.

Сделать выводы о наличии/отсутствии в сети ошибок центрирования и измерения высоты антенны, а также о соответствии невязок паспортной точности приемника.

Сравнение измеренных и вычисленных длин линий между пунктами IGS.

Вычислить по данным табл. 1.3 (координатам X , Y , Z) расстояния между пунктами IGS на эпоху 2013 г. и на дату наблюдения. Сравнить с длиной базовой линии, полученной из обработки измерений. Из отчета по обработке базовых линий выписать СКП. Заполнить табл. 1.9.

Таблица 1.9

Контроль длины базовой линии между пунктами IGS

Эпоха	Начало и конец вектора базовой линии	Длина базовой линии между пунктами IGS, м		Разность выч. – изм., м	СКП единичного измерения (RMS), м
		вычисл.	измер.		
2013					
Наблюдения					

Сделать выводы об адекватности оценки точности при обработке базовой линии. Оценка точности адекватна, если разность между вычисленной и измеренной длиной линии попадает в доверительный интервал, задаваемый СКП единичного измерения, приблизительно равный 2СКП . Сравнить между собой результаты для двух эпох, сделать выводы.

4. Уравнивание спутниковой геодезической сети для получения положения пункта в системе координат ITRF

4.1. Задание точных координат пунктов IGS

В ПО ТВС на схеме сети выбрать пункты IGS, вызвать правой кнопкой мыши контекстное меню «Свойства». В окне «Свойства» выбрать значок $\oplus$, ввести точные координаты из табл. 1.4, назначить им статус «опорные» $\triangle$.

Исключить из обработки линию между пунктами IGS (указатель мыши навести на линию, нажать правую кнопку, в контекстном меню выбрать опцию *Исключить*).

4.2. Уравнивание спутниковой сети

Выбрать в главном меню опции *Съемка – уравнивание*. Зафиксировать положение пунктов IGS в плане и по высоте ($2D$ и $в$). Подтвердить команду *Уравнять*. В результате уравнивания должны быть успешно пройдены статистические тесты.

4.3. Вывод отчета по уравниванию

Просмотреть отчет по уравниванию (*Меню – Отчеты*). Выписать значения уравненных координат и их СКП в табл. 1.10. Сюда же записать результаты для данного пункта, полученные студентами по другим вариантам.

Таблица 1.10

Уравненные координаты начального пункта СГС в СК ITRF

Вариант, Ф.И.О.	$B, ^\circ ' ''$	$m_B, \text{м}$	$L, ^\circ ' ''$	$m_L, \text{м}$	$H, \text{м}$	$m_H, \text{м}$

Сравнить уравненные координаты пункта с навигационным решением, а также с результатами других вариантов для данного пункта. Полученные разности перевести в линейную меру. Заполнить табл. 1.11. Сравнить расхождения в координатах с СКП из уравнивания, сделать выводы об адекватности оценки точности при уравнивании.

Таблица 1.11

Разности полученных координат начального пункта СГС
с навигационным решением и результатами других вариантов

Разности урав- ненных координат	$\Delta B, ''$	$\Delta B, \text{м}$	$\Delta L, ''$	$\Delta L, \text{м}$	$\Delta H, \text{м}$
Навигационное решение					
Другой вариант					
Другой вариант					

5. Составление пояснительной записки и отчета по работе

Привести следующую информацию для своего варианта:

- цель и задачи работы;
- описание геодезических сетей, к которым относятся определяемые пункты;
- исходные данные (пункты, наблюдения, эфемериды, даты, продолжительность сеансов и т. д.);
- решенные задачи (что было сделано);
- контроли решения;
- выводы.

Отчет по практической работе № 1 должен содержать: все заполненные таблицы с необходимыми промежуточными выводами, схему спутниковой геодезической сети с указанием масштаба, пояснительную записку. Основным выводом по работе является заключение о точности рассматриваемого метода получения координат исходного пункта спутниковой геодезической сети (внутренний и внешний контроль), а также ответ на вопрос, достаточно ли использовать в данном случае результаты навигационного решения из суточного файла ГНСС-измерений.

Контрольные вопросы

1. Способы задания координат начального пункта и их погрешности.
2. Для чего необходимо знать координаты начального пункта спутниковой геодезической сети?
3. Международная ГНСС-служба МГС (IGS). Какие результаты деятельности службы использовались в работе? Как их можно получить?
4. Активные базовые станции. Понятие, примеры.
5. В какой системе координат вычисляется положение начального пункта спутниковой геодезической сети в процессе привязки к пунктам IGS?
6. Внешние и внутренние контроли решения задачи.
7. Почему длина линии между пунктами IGS, вычисленная по координатам на разные эпохи, не всегда постоянна?
8. С какой точностью были получены координаты начального пункта в данном случае?
9. На какие величины отличаются полученные результаты от навигационного решения из суточного файла измерений?

Практическая работа № 2

УРАВНИВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Бюджет времени: 4 часа аудиторных занятий и 4 часа самостоятельной работы.

Цель и задачи работы: освоить технологию обработки спутниковых измерений, научиться выполнять минимально ограниченное уравнивание и интерпретировать его результаты.

Исходные данные:

- координаты начального пункта спутниковой геодезической сети в общеземной системе координат (WGS-84 или ITRF);
- файлы измерений на пунктах спутниковой геодезической сети;
- схема спутниковой геодезической сети;
- таблица идентификаторов пунктов;
- файлы точных эфемерид на даты наблюдений;
- руководство пользователя ПО ТВС [6].

Для выполнения работы, составления отчета и ответов на контрольные вопросы рекомендуется ознакомиться с соответствующими разделами изданий [7, 8, 9].

Общие теоретические сведения

Главная цель уравнивания спутниковых сетей – представление геодезических координат пунктов (их вероятнейших значений) в необходимой системе координат с оценкой точности. Для достижения этих целей используются известные теоретические и практические методы, имеющие достоверное статистическое обоснование.

В задачи уравнивания входит:

- согласование совокупности всех измерений в сети;
- анализ ошибок ГНСС-измерений (обнаружение грубых и больших ошибок, исключение систематических ошибок, распределение случайных ошибок измерений по методу наименьших квадратов);

- получение набора уравненных координат и соответствующих им элементов базовых линий с оценкой точности в виде ковариационных матриц или погрешностей;

- трансформирование координат в требуемую систему;

- преобразование геодезических высот в нормальные.

Исходными данными для уравнивания являются векторы базовых линий и их ковариационные матрицы. В качестве дополнительных исходных данных при уравнивании спутниковой геодезической сети могут использоваться координаты опорных пунктов (одного или нескольких) в геоцентрической системе – WGS-84, ITRF, ПЗ-90, а также плановые и высотные координаты опорных пунктов в референцной системе.

Уравнивание спутниковой геодезической сети может быть свободным, минимально ограниченным и ограниченным.

Свободное уравнивание. Начальная стадия уравнивания сети, где неизвестны координаты всех пунктов. Составленная система уравнений имеет дефект ранга, равный трем.

Минимально ограниченное уравнивание. Выполняется, если заданы и зафиксированы (считаются неизменными) координаты исходного, начального пункта спутниковой геодезической сети в геоцентрической системе отсчета. Результаты свободного и минимально ограниченного уравнивания отражают внутреннюю точность сети, образованной измеренными базовыми линиями и не деформированной ошибками исходных данных (координат пунктов). Уравненные координаты пунктов получаются в системе, к которой относится исходный пункт. Поскольку координаты этого пункта в геоцентрической системе определены с некоторой ошибкой (см. практическую работу № 1 настоящего сборника), то и уравненные координаты определяемых пунктов будут иметь те же ошибки. Отсюда есть смысл говорить о квазигеоцентрической системе координат. Вся спутниковая сеть, составленная векторами базовых линий, будет в СК, оси которой параллельны геоцентрической СК, а начало смещено относительно геоцентра на величину ошибки положения исходного пункта сети. Минимально ограниченное уравнивание не искажает форму и размеры высокоточной спутниковой геодезической сети.

Ограниченное уравнивание. Выполняется при задании и фиксировании более чем трех координат; тем самым накладываются дополнительные ограничения по отношению к минимально необходимым. Производится после успешного завершения минимально ограниченного уравнивания, как правило, в референцной системе координат.

В данной практической работе предусмотрено только минимально ограниченное уравнивание спутниковой геодезической сети.

Статистические тесты уравнивания. В ПО обработки ГНСС-измерений результаты уравнивания проходят статистические тесты для выявления и устранения возможных ошибок. Основным испытанием в коммерческих ПО, как правило, является *тест χ^2* , который проверяет соответствие априорной и апостериорной ошибок единицы веса. С помощью χ^2 -теста оценивается приемлемость всего уравнивания. Если тест для сети проходит, это свидетельствует о нормальном распределении ошибок измерений и о том, что достигнутая точность соответствует ожидавшейся точности. Когда на вход программы уравнивания поступает не реальная ковариационная матрица, получаемое решение не будет проходить тест χ^2 .

В коммерческих ПО уравнивания СГС, как правило, используются два метода корректировки ковариационных матриц:

- масштабирование ковариационных матриц;
- модификация отдельных элементов ковариационных матриц.

В первом методе применяется некоторый масштабирующий коэффициент (скаляр), на который умножаются все элементы ковариационной матрицы. В ПО ТВС значение скаляра назначается автоматически, на основании сравнения априорной и апостериорной ошибок единицы веса по сети, и такая процедура называется *Взвешивание сети*.

Второй метод основан на зависимостях ошибок планового положения m_D и высоты m_H от расстояния D между пунктами:

$$m_D = a + b \cdot D; \quad m_H = a' + b' \cdot D.$$

Постоянные члены a и a' можно рассматривать как ошибку центрирования или ошибку измерения высоты антенны. Эти величины задаются при настройках проекта в ПО ТВС.

С помощью статистического *т-теста* проверяется гипотеза о том, что все остаточные невязки имеют нормальное распределение, и выявляются грубые измерения. В отчете по уравниванию в ПО ТВС измерения, не прошедшие т-тест, обозначаются красным цветом.

Для отображения точности уравненных координат применяются *эллипсы (эллипсоиды) ошибок*. Эллипс ошибок характеризуется размером и ориентировкой большой и малой полуоси, и показывает размеры области доверия к координатам отдельной точки, независимо от любых других точек в уравнивании.

Отчеты по уравниванию. В коммерческих ПО обработки ГНСС-измерений отчеты по уравниванию содержат, как правило, следующую информацию: наименование системы координат, в которой выполнялось уравнивание, результаты статистического тестирования (пройдены или нет χ^2 -тест и t -тест), число степеней свободы, ковариационные матрицы уравненных координат, уравненные координаты пунктов (эллипсоидальные и в заданной картографической проекции), их СКП, параметры эллипсов ошибок (большая, малая полуоси и ориентировка большой полуоси), их графическое отображение, уравненные измерения.

Методика выполнения работы

1. Создание, настройка проекта, импорт данных в проект

Процедура выполняется аналогично описанию в практической работе № 1. Системой координат проекта в ПО ТВС должна быть принята *по умолчанию WGS-84*. При настройках *СКП по умолчанию* задать ошибки центрирования и измерения высоты антенны, соответствующие пунктам СГС своего варианта.

При импорте данных производится внесение необходимых исправлений (названий точек, методов измерения высоты антенны и пр.). При этом необходимо свериться с таблицей идентификаторов пунктов: для одних и тех же пунктов могут быть разные (хотя и похожие) идентификаторы.

В результате следует заполнить табл. 2.1.

Таблица 2.1

Файлы измерений спутниковой геодезической сети

№ п/п	Идентификатор пункта	Типы и номера приемников	Имя файла	Дата измерений	Сеанс измерений		Внесенные изменения при импортировании файла
					начало	конец	
...							

После импорта ГНСС-измерений в окне ПО отобразится схема спутниковой геодезической сети, которую необходимо привести в отчете с указанием масштаба.

2. Просмотр навигационных решений

Перед обработкой данных выписать эллипсоидальные и прямоугольные координаты пунктов, полученные из навигационного решения (*свойства точек*), заполнить табл. 2.2.

Таблица 2.2

Координаты пунктов СГС из навигационного решения

Идентификатор пункта	$B, ^\circ ' ''$	$L, ^\circ ' ''$	$H, \text{ м}$	$X, \text{ м}$	$Y, \text{ м}$	$Z, \text{ м}$
...						

3. Обработка базовых линий и внешний контроль качества решения

Обработка базовых линий выполняется аналогично описанию в практической работе № 1. После завершения процедуры обработки следует просмотреть отчет (*Меню – Отчеты*) и заполнить табл. 2.3.

Таблица 2.3

Характеристики базовых линий

№ п/п	Начало и конец вектора базовой линии	Длина базовой линии, м	Тип решения	Отношение дисперсий (Ratio)	Точность в плане, м	Точность по высоте, м	СКП единичного измерения (RMS), м
...							

Внешний контроль качества ГНСС-измерений выполняется путем вычисления невязок в полигоне. Выбрать в Меню *Съемка* опцию *Замыкание контура GNSS*. Из отчета записать сведения:

- длина полигона;
- невязка в плане;
- невязка по высоте;
- относительная погрешность.

Сделать выводы о наличии/отсутствии в сети ошибок центрирования или измерения высоты антенны, а также о соответствии невязок паспортной точности приемника.

Если имеются недопустимые невязки в плане и по высоте, следует, по возможности, идентифицировать пункт с наличием ошибок и исправить их. В крайнем случае, исключить пункт из обработки с соответствующим примечанием.

Полученные значения невязок в плане и по высоте, при отсутствии грубых ошибок центрирования и измерения высоты антенны, могут быть заданы перед выполнением уравнивания в настройках проекта *СКП по умолчанию*.

4. Минимально ограниченное уравнивание локальной спутниковой геодезической сети. Анализ результатов

При выполнении работы выбираются стандартные настройки уравнивания в ПО ТВС. В настройках проекта *СКО по умолчанию* задать в строке *GNSS* ошибку измерения высоты антенны и ошибку центрирования. Максимальное количество итераций при уравнивании, а также величину доверительной вероятности (95 %) оставить по умолчанию. Настройки уравнивания перечислить в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Настройки и результаты уравнивания

Настройки уравнивания	Значения	Результаты уравнивания	Значения
Ошибка центрир., м		Пройден ли с 1 раза тест χ^2 (да/нет)	
Ошибка измер. высоты антенны, м		Скалярный множитель (если выполнялось Взвешивание)	
Максимальное количество итераций		Число степеней свободы (reference factor)	
Доверительная вероятность	95 %	Количество измерений, не прошедших тау-тест (выбросы)	

В ПО ТВС на схеме сети выбрать исходный пункт спутниковой геодезической сети, вызвать правой кнопкой мыши контекстное меню *Свойства*. В окне *свойства* выбрать значок $\oplus$, ввести точные координаты, назначить им статус *Опорные* (Δ). Точные координаты исходного пункта выдаются преподавателем или берутся из практической работы № 1.

Выбрать в главном меню опции *Съемка – Уравнивание*. Зафиксировать положение исходного пункта СГС в плане и по высоте (*2D и в*). Подтвердить команду *Уравнять*. В результате уравнивания должны быть

успешно пройдены статистические тесты. Если этого не произошло, то следует выполнить процедуру *Взвешивание сети* и повторить процедуру. Записать величину скалярного множителя в табл. 2.4.

Просмотреть отчет по уравниванию СГС (*Меню – Отчеты*). По виду эллипсов ошибок определить, равноточны ли уравненные координаты пунктов по всем трем направлениям. Найти пункты с максимальными СКП и, по возможности, объяснить причину больших ошибок на этих пунктах.

Записать значения уравненных координат и их СКП в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Уравненные координаты в пунктов СГС в WGS-84

Идентифи- катор пункта	B 0, "	m_B , м	L 0, "	m_L , м	H , м	m_H , м
...						
...						

Сравнить уравненные координаты с навигационным решением. Выделить систематические и случайные смещения, сделать выводы, почему они возникли.

Вычислить расстояния между тремя указанными преподавателем пунктами спутниковой геодезической сети по уравненным прямоугольным пространственным координатам. Координаты (X , Y , Z) вычислить с параметрами эллипсоида WGS-84 по формулам:

$$\begin{aligned} X &= (N + H)\cos B \cos L; \\ Y &= (N + H)\cos B \sin L; \\ Z &= (N - Ne^2 + H)\sin B, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где B , L , H – уравненные геодезические координаты пунктов из табл. 2.5.

Вычислить пространственный угол между двумя векторами базовых линий, дважды: между измеренными и между уравненными векторами. Результаты, до 0,000 1", занести в табл. 2.6. Формулу для вычисления угла вывести самостоятельно из выражения для скалярного произведения двух векторов.

Сравнить вычисленные расстояния с соответствующими длинами базовых линий. Составить разности и сравнить с СКП единичного измерения базовой линии из табл. 2.3. Результаты занести в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Сравнение расстояний между пунктами и углов после
минимально ограниченного уравнивания

БЛ	Расст. выч., м	Расст. измер., м	Разность выч. – изм., м	СКП, м	Угол между изм. БЛ, о, "	Угол между уравн. БЛ, о, "	Разность уравн. – изм., "
					—	—	—

Сделать выводы, изменяются ли расстояния между пунктами и углы между направлениями после минимально ограниченного уравнивания.

Сохранить проект, в котором выполнялось минимально ограниченное уравнивание. Этот проект будет основой для выполнения практической работы № 5.

Отчет по практической работе № 2 должен содержать: все заполненные таблицы с необходимыми промежуточными выводами, схему спутниковой геодезической сети с указанием масштаба, анализ результатов.

Контрольные вопросы

1. Что такое базовая линия?
2. Установки при решении базовых линий: бортовые/точные эфемериды, маска по высоте.
3. Критерии качества решения базовых линий. Решение float/fixed.
4. Способы улучшения качества решения базовых линий.
5. Цели и задачи уравнивания.
6. Свободное и минимально ограниченное уравнивание.
7. В какой системе координат, как правило, выполняется минимально ограниченное уравнивание?
8. Объяснить термин «квазигеоцентрическая» система координат.
9. Статистические критерии качества уравнивания.
10. Порядок минимально ограниченного уравнивания в ПО ТВС.

Практическая работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Бюджет времени: 6 часов аудиторных занятий и 6 часов самостоятельной работы.

Цель и задачи работы: исследование точности получения нормальных высот и уклонов отвесной линии с использованием моделей гравитационного поля Земли, ознакомление с современными методами получения нормальных высот с помощью ГНСС-измерений и моделей ГПЗ, получение навыков грамотного использования этих моделей в ПО обработки ГНСС-измерений.

Исходные данные:

- результаты геометрического нивелирования, астрономических и гравиметрических определений в нескольких пунктах геодезической сети (нормальные высоты, астрономические широта, долгота и азимут, аномалии силы тяжести) (прил. 5, 6);
- результаты минимально ограниченного уравнивания спутниковой геодезической сети (геодезические координаты и высоты в системе ITRF*) (прил. 5, 6);
- глобальные модели гравитационного поля Земли EGM-96, EGM-2008;
- руководство пользователя ПО TBC [6].

Общие теоретические сведения

Глобальные модели гравитационного поля Земли (ГПЗ) создаются на основе линейной аппроксимации аномального потенциала и/или его трансформант по дискретным данным. Основным методом моделирования является метод разложения геопотенциала в ряд по сферическим функциям. Он базируется на комплексном использовании различных видов измерительной информации, в том числе спутниковых траекторных измерений, данных спутниковой альтиметрии и гравиметрии. Точность и детальность

создаваемых моделей зависит от уточнения определяемых коэффициентов и от увеличения предельной степени N учитываемых сферических гармоник [10, 11].

Современные модели ГПЗ отличаются друг от друга максимальной степенью, составом измерительных данных, лежащих в их основе (спутниковое слежение, альтиметрия, наземные измерения), учетом временных вариаций. Список зарубежных моделей и информацию о них можно найти на сайте Международного центра глобальных моделей Земли (Потсдам), <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>.

Наиболее точной и детальной моделью на настоящий момент является модель EGM2008 [12]. По оценкам [13], для данной модели средняя квадратическая погрешность аномалий высоты в глобальном масштабе равна 0,11 м, а СКП уклонений отвесной линии – 1". Модель EGM2008 успешно используется в коммерческих ПО обработки ГНСС-измерений, поскольку для локальных областей (размером несколько десятков километров) разности аномалий высоты имеют более высокую точность (4–5 см), чем в глобальном масштабе.

Современные модели ГПЗ могут быть представлены двумя способами: 1) в виде набора коэффициентов разложения или 2) в виде готовых значений аномалий силы тяжести, аномалий высоты, уклонений отвесной линии, рассчитанных в узлах регулярной сетки (с определенным шагом по широте и долготе). В коммерческих ПО обработки ГНСС-измерений, как правило, используется второй вариант представления моделей ГПЗ. Так, в базе данных ПО Trimble Business Center, модели ГПЗ в виде совокупности аномалий высоты содержатся в файлах с расширением *.ggf. К таким моделям прилагается математический аппарат интерполяции значений в произвольно заданных точках.

О точности моделей ГПЗ можно судить по характеристикам определения трансформант возмущающего потенциала – высоты квазигеоида ζ , аномалии силы тяжести Δg , составляющих уклонений отвесной линии в меридиане и первом вертикале ξ, η [14]. В настоящей практической работе предусмотрено исследование точности получения высоты квазигеоида и уклонений отвесной линии с помощью глобальной модели ГПЗ EGM2008, а также сравнение этой модели с ее предыдущей версией EGM96.

Для выполнения практической работы необходимо иметь четкое представление об основных отсчетных поверхностях. Как известно из

курса высшей геодезии [15], *геоид* – уровенная поверхность поля силы тяжести, близкая к невозмущенному среднему уровню океанов и сообщаемых с ним морей и проходящая через начало отсчета высот. Для определения его фигуры под районами суши необходимо знать распределение силы тяжести (или плотностей) внутри земной коры, что принципиально невозможно.

Строгое решение задачи определения фигуры Земли предложил выдающийся советский ученый, геофизик, геодезист и гравиметрист М. С. Молоденский. Он ввел понятие *квазигеоида* – поверхности, однозначно определяемой по наземным измерениям, совпадающей с геоидом на морях и океанах и очень близко подходящей к нему на суше, и тем самым показал возможность чисто геометрического изучения фигуры Земли по результатам измерений на ее поверхности, без привлечения гипотез о ее внутреннем строении [16].

Различие между высотой геоида N и высотой квазигеоида ζ над эллипсоидом (рис.1) может учитываться с использованием соотношения [15]

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

где H^{γ} – нормальная высота; γ_0 – среднее значение нормального ускорения силы тяжести на общеземном эллипсоиде; Δg_B – простая аномалия Буге.

В равнинных и всхолмленных районах ($H < 500$ м) расстояние между геоидом и квазигеоидом менее 2,5 см; в горных районах при высотах 5 км и выше расстояние может достигать величины 2 м [15].

Нормальные высоты H^{γ} , получаемые строго по результатам геометрического нивелирования, отсчитываются от поверхности квазигеоида по нормали к эллипсоиду (рис. 3.1); *ортометрические* высоты H^g – от поверхности геоида, не определенной под материками. Бесспорные преимущества системы нормальных высот привели к тому, что она нашла всеобщее применение сначала в СССР, а затем и во многих других странах [17, 18]. *Геодезические* высоты H отсчитываются от эллипсоида по нормали к нему.

В настоящее время в зарубежной геодезической практике принято называть полученные из геометрического нивелирования высоты «ортометрическими», а также некорректно оперировать понятием «геоид» вместо строго определенного «квазигеоида». В ПО обработки ГНСС-измерений, интерфейс которых выполнен изначально, как правило, на английском языке, геодезическая высота именуется «Height», а высота из геометриче-

ского нивелирования – «Elevation». Модели квазигеоида, подключаемые в систему координат проекта из базы данных ПО, называются «geoid model», а в русскоязычных версиях ПО – «модели геоида», хотя необходим перевод «модели *квазигеоида*». Специалистам в области геодезии необходимо различать эти понятия, а для более глубокого понимания вопроса изучать труды ученого мирового уровня М. С. Молоденского, посвященные теории фигуры Земли.

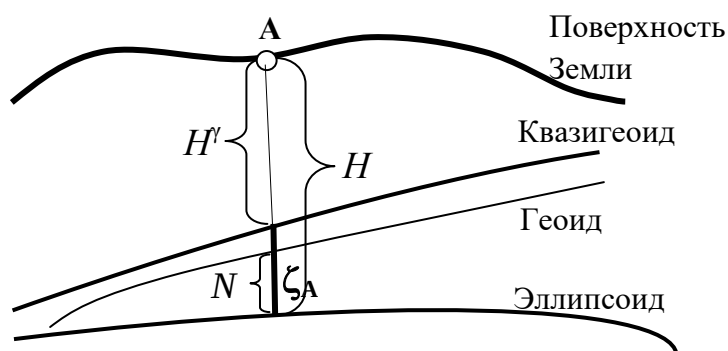


Рис. 3.1. Соотношение между нормальными и геодезическими высотами

Одна из целей настоящей практической работы состоит в освоении современных методов получения нормальных высот с помощью ГНСС-измерений и модели квазигеоида.

Непосредственно из обработки ГНСС-измерений определяются положения пунктов в геометрической трехмерной системе координат – прямоугольные (X, Y, Z) или, относительно эллипсоида с параметрами (a, e), геодезические (L, B, H). Необходимые в геодезической практике нормальные высоты H' вычисляются из геометрического соотношения, связывающего геодезическую (эллипсоидальную) высоту H , нормальную высоту H' и высоту квазигеоида ζ (см. рис. 3.1)

$$H' = H - \zeta, \quad (3.1)$$

где H – геодезическая высота, получаемая из уравнивания ГНСС-измерений;

ζ – высота квазигеоида над эллипсоидом.

Высота квазигеоида (аномалия высоты) может быть получена различными способами: гравиметрическим и астрономо-гравиметрическим нивелированием, или с использованием математической модели гравитаци-

онного поля Земли. В ГНСС-технологиях аномалию высоты, как правило, получают с использованием глобальных, региональных или локальных моделей квазигеоида.

Проблема использования соотношения (3.1) состоит в том, что имеются систематические сдвиги во всех трех компонентах. Можно записать

$$Z + \delta\zeta = (H + \delta H) - (H' + \delta H'), \quad (3.2)$$

где δH , $\delta H'$, $\delta\zeta$ – соответствующие систематические сдвиги.

Основная причина систематического *сдвига в эллипсоидальных высотах* δH заключается в негеоцентрической реализации референцной системы (1–2 метра для «общеземных» эллипсоидов), а также в навигационной ошибке начального пункта ГНСС-сети, которая может достигать нескольких метров. Определение превышений между пунктами спутниковой сети свободно от сдвига эллипсоидальных высот, обусловленных указанными причинами.

Сдвиг нормальных высот $\delta H'$ обусловлен 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 уравниваем в разное время, без учета геодинамики.

Сдвиг высот квазигеоида $\delta\zeta$. Систематические отклонения высот квазигеоида, получаемых с помощью моделей ГПЗ, вызваны несогласованностью в параметрах Земли, а также с неучтенными локальными особенностями квазигеоида.

При получении нормальных высот по данным ГНСС-измерений совместно с моделью ГПЗ необходимо помнить о существовании указанных систематических сдвигов и грамотно применять модели для получения наиболее точных результатов.

В данной практической работе, кроме исследования точности высот квазигеоида, предусмотрено определение составляющих уклонения отвесной линии с помощью модели ГПЗ, а также вычисление астрономических координат и азимутов. Как известно из курсов высшей геодезии, гравиметрии, уклонение отвесной линии (в геометрическом определении) –

угол между направлением вектора силы тяжести и нормалью к эллипсоиду в заданной точке. В геодезии, как правило, используют составляющие отклонения отвесной линии – в меридиане ξ и первом вертикале η . Уклонения отвесной линии в первом приближении могут рассматриваться и как углы между поверхностями эллипсоида и квазигеоида. Через уклонения отвесной линии связаны астрономические долгота λ , широта φ и астрономический азимут a^* , относящиеся к отвесной линии, и геодезические координаты (L, B, H) , относящиеся к нормали к эллипсоиду:

$$\varphi = B + \xi, \lambda = L + \eta / \cos B, a^* = a + (\lambda - L) \sin B - (\eta \cos a - \xi \sin a) \operatorname{ctg} z, \quad (3.3)$$

где a, z – геодезический азимут и зенитное расстояние направления.

Для выполнения работы, составления отчета и ответов на контрольные вопросы рекомендуется ознакомиться с соответствующими разделами изданий [8, 15, 18, 19, 20].

Методика выполнения работы

1. Оценка точности получения нормальных высот в ГНСС-технологиях с использованием глобальных моделей EGM-96 и EGM-08

1.1. Подключение модели гравитационного поля Земли

В работе выполняется исследование двух глобальных моделей – EGM96 и EGM2008. Сначала следует создать новый проект в ТВС, где в закладке *Системы координат* выбрать опцию *изменить систему координат* и подключить необходимую модель из списка. Основной системой координат должна остаться WGS-84.

Если заданной модели нет в списке, то следует вызвать утилиту *Coordinate System Manager* и подключить новую модель ГПЗ (см. прил. 4).

1.2. Получение нормальных высот в точках с известными геодезическими координатами.

В меню ПО ТВС выбрать опцию *Вставка* и вставить точки по заданным в варианте геодезическим координатам L, B, H , полученными в ре-

зультате уравнивания спутниковой геодезической сети (прил. 5). Схему расположения точек с указанием масштаба привести в отчете по работе.

Вызвать в основном меню *Вид – Таблица точек* и выписать нормальные высоты пунктов спутниковой геодезической сети. Или, другим способом, выписать высоты точек из контекстного меню *Свойства*. В табл. 3.1 записать полученные значения с использованием моделей EGM96, EGM2008, а также известные нормальные высоты, полученные из геометрического нивелирования. Здесь же получить разности вычисленных по модели и измеренных значений высот, а также разности высот, полученных из двух моделей.

Таблица 3.1

Использование глобальных моделей ГПЗ
для вычисления нормальных высот пунктов

Идентификатор	H' , м исходн.	H' , м EGM-96	H' , м EGM-08	Разности, м		
	1	2	3	(2–1)	(3–1)	(3–2)
...						

1.3. Определение и исключение систематического сдвига по высоте

Вычислить и записать систематические сдвиги dh для обеих моделей как среднее арифметическое из разностей вычисленных по модели и измеренных нормальных высот:

$$dh_{96} =$$

$$dh_{08} =$$

Исправить вычисленные по моделям нормальные высоты, отняв от каждой систематический сдвиг dh . Заполнить табл. 3.2.

Таблица 3.2

Использование глобальных моделей ГПЗ для вычисления
нормальных высот пунктов. Снятие постоянного сдвига по высоте dh

Идентификатор	H' , м исходн.	$H' - dh$, м EGM-96	$H' - dh$, м EGM-08	Разности, м	
	1	2	3	(2–1)	(3–1)
...					

Вычислить средние квадратические погрешности получения нормальных высот по формуле:

$$\text{СКП} = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}},$$

где $i = 1, \dots, n$; n – количество точек; v_i – разности вычисленных и измеренных нормальных высот после исключения систематического сдвига (из табл. 3.2).

Записать значения СКП для двух моделей:

$$\text{СКП}_{96} = \quad \text{СКП}_{08} =$$

1.4. Анализ полученных результатов

Указать величину полученного систематического сдвига по высоте и объяснить его наличие. Сравнить модели EGM 2008 и EGM96 между собой. Сделать выводы по точности получения нормальных высот (к какому классу нивелирования можно отнести полученные результаты). Дать рекомендации по использованию моделей ГПЗ в ГНСС-технологиях, а также по повышению точности получения нормальных высот с помощью ГНСС-измерений и моделей квазигеоида.

2. Оценка точности получения астрономических координат (φ, λ) и азимутов α^* направлений с использованием глобальной модели гравитационного поля Земли

2.1. Принцип определения уклонов отвесной линии численным методом

Принцип приближенного определения наклона квазигеоида к эллипсоиду численным методом можно отобразить на рис. 3.2.

Как видно из рисунка, наклон i квазигеоида относительно эллипсоида в направлении АБ может быть вычислен по формуле

$$i'' = 206\,265''(\zeta_B - \zeta_A)/S,$$

где $\zeta_A = H_A - H'_A$ – высота квазигеоида над эллипсоидом в точке А;

$\zeta_B = H_B - H'_B$ – высота квазигеоида над эллипсоидом в точке Б;
 S – расстояние между точками А и Б на эллипсоиде.

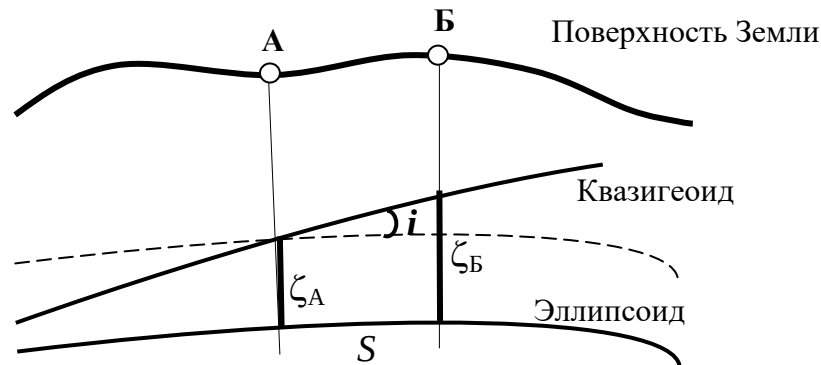


Рис. 3.2. Определение наклона квазигеоида относительно эллипсоида

Если две точки расположены в одном меридиане, то полученный наклон есть уклонение отвесной линии в плоскости меридиана ξ ; перпендикулярное же направление дает уклонение отвесной линии в плоскости первого вертикала η .

2.2. Вычисление уклонений отвесной линии численным методом

Вычисление уклонений отвесной линии выполняется в следующем порядке. Создать новый проект в ТВС, подключить модель EGM2008. Вставить в проект ТВС два пункта, астрономические и геодезические координаты которых известны (из прил. 6). В окрестностях каждого пункта добавить по четыре точки: две в меридиане на расстоянии $\pm\Delta B$ и две в первом вертикале на расстоянии $\pm\Delta L$. Шаг ΔB и ΔL задается преподавателем. Примерная схема расположения точек изображена на рис. 3.3.

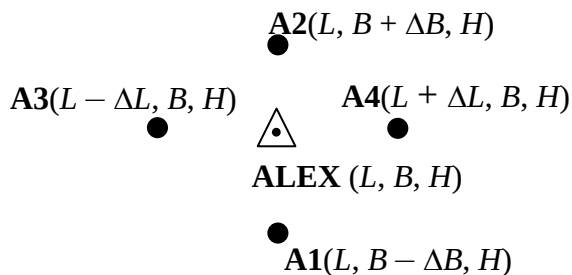


Рис. 3.3. Схема расположения точек для определения наклонов квазигеоида

В каждой из четырех точек следует вычислить высоты квазигеоида над эллипсоидом $\zeta = H - H'$, где геодезические высоты H и нормальные высоты выписываются из *свойств* точек или из *Таблицы точек*. Далее вычисляются разности высот квазигеоида в меридиане и первом вертикале:

$$\Delta\zeta_B = \zeta_2 - \zeta_1, \quad \Delta\zeta_L = \zeta_4 - \zeta_3.$$

Полученные результаты следует занести в табл. 3.3.

Уклонения отвесной линии в плоскостях меридиана (ξ) и первого вертикала (η) вычисляются по формулам:

$$\xi'' = -206\,265'' \frac{\Delta\zeta_B}{2\Delta B \cdot M}, \quad \eta'' = -206\,265'' \frac{\Delta\zeta_L}{2\Delta L \cdot N \cos B},$$

где ΔB и ΔL выражены в радианах.

В формулах M , N – радиусы кривизны эллипсоида в меридиане и в первом вертикале,

$$M = a(1 - e^2) / (1 - e^2 \cdot \sin^2 B)^{3/2}; \quad N = a / (1 - e^2 \cdot \sin^2 B)^{1/2}.$$

Результаты вычисления уклонений отвесной линии занести в табл. 3.3

Таблица 3.3

Результаты вычисления уклонений отвесной линии

Точки	H , м	H' , м	ζ , м	$\Delta \zeta$, м	ξ , "
1					
2					
					η , "
3					
4					

2.3. Вычисление астрономических координат и азимутов направлений

Астрономические широта ϕ , долгота λ и азимут направления a^* вычисляются по формулам (3.3), приведенным в теоретической части практической работы. В прил. 6 даны геодезические координаты, геодезический азимут и зенитное расстояние направления. Результаты вычисления астрономических координат и азимутов занести в табл. 3.4. Сюда же запи-

сать исходные (измеренные) астрономические координаты и азимуты (см. прил. 6), вычислить разности исходных и измеренных значений.

Таблица 3.4

Результаты вычисления астрономических координат
и азимутов с использованием глобальной модели геоида

Идентифи- катор	φ λ исходн., 0, "	φ λ вычисл., 0, "	Разности астр. коорд, "	a^* исходн., 0, "	a^* вычисл., 0, "	Разности азимутов, "

2.4. Анализ полученных результатов и выводы

Указать, к какому классу астрономических определений можно отнести полученные результаты получения астрономических координат. Оценить априорную точность получения уклонений отвесной линии (основываясь на количестве значащих цифр). Сделать выводы о точности глобальной модели гравитационного поля Земли в плане представления уклонений отвеса.

3. Обзор современных моделей геоида

Привести краткое описание модели EGM2008. Сделать обзор глобальных моделей ГПЗ, заданных преподавателем, на основе сайта <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>.

Отчет по практической работе № 3 должен содержать: все заполненные таблицы с необходимыми промежуточными выводами, схему расположения пунктов с указанием масштаба, анализы результатов по пунктам 1 и 2, обзор модели EGM2008 и модели ГПЗ, заданной преподавателем. Основным выводом по работе является заключение о точности получения нормальных высот и уклонений отвесной линии (астрономических координат) с помощью ГНСС-измерений и модели квазигеоида.

Контрольные вопросы

1. Основная формула для получения нормальных высот в ГНСС-технологиях. От чего зависит точность вычисляемой нормальной высоты?
2. Источники систематических сдвигов по высоте.
3. Глобальные модели гравитационного поля Земли, используемые в ГНСС-технологиях для получения нормальных высот.
4. Модель EGM2008. Исходные данные для построения, степень, форма представления, точность.
5. Какому классу нивелирования соответствуют нормальные высоты, полученные в работе? Пути повышения точности нормальных высот, получаемых с помощью модели квазигеоида.
6. Геометрическое определение уклонов отвесной линии.
7. Какому классу астрономических определений соответствуют астрономические координаты и азимуты, полученные в работе?
8. Определение геодезических и нормальных высот.
9. Определение геодезических и астрономических координат.

Практическая работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ЛОКАЛЬНОГО КВАЗИГЕОИДА ПО СПУТНИКОВЫМ, НИВЕЛИРНЫМ, АСТРОНОМИЧЕСКИМ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Бюджет времени: 6 часов аудиторных занятий и 6 часов самостоятельной работы.

Цель и задачи работы: освоение методики определения параметров модели локального квазигеоида с помощью модуля «Калибровка по высоте» в ПО обработки ГНСС-измерений, вычисление нормальных высот точек локальной спутниковой геодезической сети, оценка точности параметров модели и нормальных высот.

Исходные данные:

- результаты геометрического нивелирования в нескольких пунктах геодезической сети (прил. 5);
- результаты минимально ограниченного уравнивания спутниковой геодезической сети (геодезические координаты и высоты в системе ITRF*) (см. прил. 5);
- глобальная модель ГПЗ EGM-2008;
- руководство пользователя ПО ТВС [6].

Для выполнения работы, составления отчета и ответов на контрольные вопросы рекомендуется ознакомиться с соответствующими разделами изданий [8, 19, 21].

Общие теоретические сведения

В ГНСС-технологиях точность получения нормальных высот на ограниченной территории (размера локальной СГС) можно повысить путем построения математической модели локального квазигеоида на данную территорию. Для этого необходимо, чтобы в нескольких пунктах спутниковой геодезической сети с координатами (B , L , H) были известны нормальные высоты H^y из геометрического нивелирования. В качестве дополнительной информации могут быть отклонения отвесной линии (ξ , η), по-

лучаемые из астрономических определений координат (ϕ, λ) (формула (3.3)), а также аномалии силы тяжести Δg [21].

Поверхность квазигеоида можно строить с использованием различных математических моделей (сплайны, полиномы, вейвлеты). Для небольших областей, размером несколько десятков километров, наиболее простым и подходящим вариантом является аппроксимация поверхности квазигеоида полиномами низких степеней (первого или второго порядка).

Вид полиномов, содержащих определяемые параметры модели, следующий:

$$\sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^n a_{lm} (B_i - B_0)^l (L_i - L_0)^m = H_i - H_i^y, \quad i = 1, \dots, k, \quad (4.1)$$

где B_0, L_0 – координаты некоторой начальной точки СГС;

B_i, L_i, H_i – плановые координаты текущей точки СГС, с известными нормальными высотами H_i^y ;

k – количество точек с известными нормальными высотами;

n – степень полинома.

Система уравнений вида (4.1) может быть дополнена выражениями, содержащими в правой части уклонения отвесной линии:

$$\sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^n l \cdot a_{lm} (B_i - B_0)^{l-1} (L_i - L_0)^m = -\frac{\xi_i''}{\rho''} (M_i + H_i); \quad i = 1, \dots, k, \quad (4.2)$$

$$\sum_{l=0}^n \sum_{m=0}^n m \cdot a_{lm} (B_i - B_0)^l (L_i - L_0)^{m-1} = -\frac{\eta_i''}{\rho''} (N_i + H_i) \cos B_i; \quad i = 1, \dots, k, \quad (4.3)$$

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

В уравнениях (4.1)–(4.3) разности плановых геодезических координат $(B_i - B_0)$ и $(L_i - L_0)$ выражены в радианах.

В приведенных выражениях (4.1)–(4.3) коэффициент a_{00} – высота квазигеоида над эллипсоидом в начальной точке СГС, a_{10}, a_{01} характеризуют наклоны квазигеоида относительно эллипсоида в начальной точке, в направлении меридиана и первого вертикала, соответственно.

В коммерческих ПО обработки ГНСС-измерений (ПО ТВС) для улучшения качества получения нормальных высот используется процедура, называемая *Калибровка по высоте*. Здесь определяются параметры

полиномиальной модели первого порядка по степеням разностей плановых плоских координат в какой-либо выбранной проекции:

$$a_{00} + a_{10}(x_i - x_0) + a_{01}(y_i - y_0) = H_i - H'_i, \quad i = 1, \dots, k, \quad (4.4)$$

где x_i, y_i – координаты текущей точки, в которой известны нормальная H'_i и геодезическая H_i высоты;

x_0, y_0 – координаты некоторой начальной точки.

Если в Проект ТВС уже подключена модель квазигеоида, то в правой части системы уравнений, решаемой при выполнении процедуры *Калибровка по высоте*, будут разности нормальных высот $H'_{\text{Геоид}}$, полученных по модели, и измеренных нормальных высот H' :

$$a'_{00} + a'_{10}(x_i - x_0) + a'_{01}(y_i - y_0) = H'_{\text{Геоид}(i)} - H'_i, \quad i = 1, \dots, k. \quad (4.5)$$

Здесь a'_{00}, a'_{10} и a'_{01} – 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 (4.4) или (4.5) 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. В ПО ТВС эта процедура реализуется через *Калибровку участка* и соответствующую *смену системы координат* Проекта.

Методика выполнения работы

1. Определение параметров модели локального квазигеоида без подключения глобальной модели геоида

В Проекте выполнить *Изменение системы координат* и отключить глобальную модель квазигеоида. Перед выполнением *Калибровки по высоте* надо вставить в Проект сдвоенные точки: одна точка в паре имеет геодезические координаты (B, L, H) в общеземной системе, другая – плоские координаты (*grid*) x, y и нормальную высоту H' . Названия сдвоенных точек не должны совпадать: например, если точка с геодезическими координатами носит название 123, то, для составления пары, точку с плоскими

координатами и нормальной высотой следует переименовать, например, в 123g.

После вставки парных точек вызывается меню *Съемка – Калибровка участка – Параметры калибровки – Вертикальная калибровка*. Здесь следует задать определение сдвига по высоте и наклонов. Из вкладки *Список точек* выбрать пары точек для расчетов параметров калибровки. Одну или две точки из списка (по указанию преподавателя) оставить в качестве контрольных для последующей проверки правильности вычислений – не включать в расчет параметров. Кнопка *Рассчитать* запускает процесс определения параметров, после чего во вкладке *Результаты* можно посмотреть сводку вычислений.

Кнопка *Сохранить как участок* позволяет использовать данные вычислений для создания новой системы координат. Результаты ГНСС-измерений, выполненных на территории калиброванного участка, в новой системе координат будут обеспечены уточненными значениями нормальных высот.

Из *Отчета по калибровке* выписать параметры преобразования – сдвиг и наклоны локального квазигеоида, координаты начальной точки, среднюю квадратическую погрешность, а также таблицу с невязками в узловых точках. Пересчитать наклоны в угловые секунды.

Изменить систему координат Проекта на *калиброванный участок*, сравнить в контрольных точках вычисленные и измеренные нормальные высоты.

Результаты оформить в табл. 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1

Параметры калибровки и средние квадратические погрешности решения

Параметры	Без подключения модели EGM2008	С подключением модели EGM2008
x_0 (восток), м		
y_0 (север), м		
ζ_0 , м		
ξ_0 , "		
η_0 , "		
СКП, м		

**Результаты вычисления нормальных высот
в узловых и контрольных точках**

Точки	H' , м – измеренная	Без подключения модели EGM2008		С подключением модели EGM2008	
		H' , м вычисл.	$(H'_{\text{выч.}} - H'_{\text{изм.}})$, м	H' , м вычисл.	$(H'_{\text{выч.}} - H'_{\text{изм.}})$, м
Узловые точки					
...					
Контрольные точки					
...					

2. Определение параметров модели локального квазигеоида с подключением глобальной модели геоида

Задать систему координат проекта с подключением глобальной модели EGM2008. Выполнить действия, аналогичные действиям в пункте 1 настоящей работы. Занести результаты в табл. 4.1 и 4.2.

3. Анализ результатов

Просмотреть значения параметров калибровки для пункта 1 (без подключения в Проект модели EGM2008). Оценить значения наклонов квазигеоида к эллипсоиду: сравнить с отклонениями отвеса, определенными в практической работе № 3; сделать выводы, имеют ли они правдоподобное значение (до 4"). Если полученные наклоны оказались слишком велики, следует объяснить данные результаты.

Просмотреть значения параметров калибровки для пункта 2 (с подключением в Проект модели EGM2008): сравнить смещение по высоте в начальной точке и систематический сдвиг по высоте, полученный в практической работе № 3. Объяснить расхождение между этими параметрами. Оценить значения поправок в глобальную модель EGM2008 за наклоны квазигеоида: соответствуют они или нет СКП определения отклонений отвесной линии, заявленной для данной глобальной модели.

Для каждого случая (пункт 1 и пункт 2) проанализировать расхождения между вычисленными и измеренными нормальными высотами в узловых

и контрольных точках. Определить наличие «выбросов» как в узловых, так и контрольных точках (если расхождение превышает удвоенную СКП). По возможности объяснить причину этих выбросов (расположение на краю области аппроксимации или вне ее, невысокая точность нивелирования, грубые ошибки при ГНСС-измерениях и пр.).

Сделать оценку, какому классу геометрического нивелирования соответствует данное определение нормальных высот. Дать заключение о том, каким методом (с подключением модели EGM2008 или нет) в данном случае нормальные высоты получены с более высокой точностью.

Отчет по практической работе № 4 должен содержать: все заполненные таблицы, схему расположения узловых и контрольных точек с указанием масштаба, подробный анализ результатов (выполненный пункт 3 работы).

Контрольные вопросы

1. Перечислить параметры модели локального квазигеоида, определяемые в работе. Назвать их геометрический смысл.
2. Исходные данные для калибровки по высоте.
3. Порядок «калибровки по высоте» в ПО ТВС.
4. Какому классу геометрического нивелирования соответствуют определения нормальных высот, сделанные в работе?
5. Пути повышения точности калибровки по высоте.
6. Сколько параметров модели квазигеоида можно определить по одной узловой точке?
7. Почему после подключения глобальной модели квазигеоида в проект все равно необходимо выполнять калибровку по высоте?

Практическая работа № 5

ПРИВЯЗКА ЛОКАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ К ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПЛАНОВОЙ И ВЫСОТНОЙ ОСНОВЕ

Бюджет времени: 4 часа аудиторных занятий и 4 часа самостоятельной работы.

Цель и задачи работы: согласование спутниковой геодезической сети и государственной геодезической сети, уравнивание и получение координат пунктов СГС в СК-95, сравнение разных видов уравнивания, приобретение навыков работы с системами координат в ПО обработки ГНСС-измерений.

Исходные данные:

- результаты минимально ограниченного уравнивания локальной спутниковой геодезической сети (проект из практической работы № 2);
- результаты традиционных координатных определений (триангуляции, полигонометрии, геометрического нивелирования, астрономических и гравиметрических определений) в нескольких пунктах геодезической сети в СК-95;
- схема спутниковой геодезической сети;
- таблица идентификаторов пунктов;
- параметры перехода от общеземной СК WGS-84 к референцной СК-95 [24];
- руководство пользователя ПО ТВС.

Для выполнения работы, составления отчета и ответов на контрольные вопросы рекомендуется ознакомиться с соответствующими разделами изданий [2, 8, 9, 23].

Общие теоретические сведения

Основным результатом минимально ограниченного уравнивания спутниковой геодезической сети являются координаты пунктов в общеземной системе координат. Однако потребителям координатной информации необходимо знать координаты пунктов в государственной (референцной) или в местной СК. Для решения этой задачи выполняется ограниченное

уравнивание в необходимой системе координат, с фиксацией положений нескольких пунктов. Дополнительными исходными данными здесь являются координаты пунктов референцной системы, получаемые по результатам традиционных (наземных) геодезических измерений: триангуляции, полигонометрии, трилатерации, геометрического нивелирования. Указанные пункты должны быть включены в спутниковую геодезическую сеть с целью ее «привязки» к государственной координатной основе.

Ограниченное уравнивание. Цель ограниченного уравнивания – включение вновь построенной сети в существующую сеть, в ее координатную систему, в том числе, в систему высот. В процессе ограниченного уравнивания выполняется преобразование координат, перевод измеренных разностей геодезических высот в разности нормальных высот. В качестве дополнительных неизвестных здесь берутся параметры связи между системами координат и высот.

Государственную координатную основу образуют государственная геодезическая сеть (пункты триангуляции, полигонометрии, трилатерации) и государственная нивелирная сеть (пункты геометрического нивелирования). Плановые положения пунктов ГГС заданы в референцной системе координат СК-95, высотные – в Балтийской системе высот БСВ-77.

Проблему корректного согласования локальной спутниковой геодезической сети (СГС) и государственной координатной основы (ГКО) обуславливают следующие факторы [22].

1. Точность относительного положения пунктов спутниковой геодезической сети примерно на порядок выше, чем соответствующая точность существующей государственной геодезической сети.

2. Спутниковая геодезическая сеть – геометрическое построение с примерно равными по точности координатами, образующее трехмерную пространственную систему. Государственные плановая и высотная основы созданы в разных системах отсчета: ГГС – в геометрической (относительно референц-эллипсоида), ГНС – в гравитационной (система нормальных высот). Для корректного согласования СГС с ГКО необходимо знать точные геодезические высоты в референцной системе координат.

3. Опубликованные глобальные параметры перехода от общеземной СК WGS-84 к референцной СК-95 имеют невысокую точность (на уровне 1–5 м).

В коммерческих ПО обработки ГНСС-измерений ограниченное уравнивание выполняется в заданной пользователем референцной системе

координат, с подключением выбранной модели квазигеоида. При этом фиксируются положения нескольких пунктов СГС с известными координатами в референцной системе. В результате уравнивания по МНК вычисляются координаты пунктов с оценкой точности. Если в исходных данных (координатах ГГС) содержатся ошибки, то ограниченное уравнивание ведет к деформации высокоточной спутниковой сети (изменению азимутов направлений и длин базовых линий).

Получение наиболее точных нормальных высот обеспечивается процедурой *Калибровка по высоте* (см. практическую работу № 4). Влияние ошибок модели квазигеоида на плановые координаты сказывается в изменении масштаба сети на величину порядка dh/R , где dh – смещение квазигеоида по высоте, R – радиус Земли. Как показывают результаты практической работы № 3, систематическое смещение квазигеоида EGM2008 по высоте относительно квазигеоида на территории Новосибирской области имеет величину около 0,5 м. Отсюда следует изменение масштаба на величину порядка 10^{-7} , то есть 1 мм на 10 км расстояния. Относительное положение пунктов ГГС в СК-95 хуже минимум на порядок, так что качество ограниченного уравнивания в первую очередь определяется точностью взаимного положения пунктов ГГС, а не ошибками глобальной модели квазигеоида EGM2008.

В процессе ограниченного уравнивания уточняются параметры преобразования координат из одной системы в другую: вектор переноса начала координат (δX , δY , δZ), вектор разворота координатных осей (ω_x , ω_y , ω_z) и масштабный параметр μ , итого 7 дополнительных неизвестных. Для этого необходимо зафиксировать координаты в референцной системе минимум трех пунктов, расположенных не на одной прямой. Желательно расположение этих пунктов в вершинах равностороннего треугольника, охватывающего территорию локальной СГС. Фиксация координат единственного пункта ГГС дает возможность уточнить только параметры переноса начала координат. Подробное описание моделей и параметров преобразования см. в практической работе № 1 по дисциплине «Космическая навигация» [23].

Для выполнения ограниченного уравнивания с целью привязки локальной СГС к государственной координатной основе, в Проекте ПО обработки ГНСС-измерений должны быть установлены соответствующая система координат и проекция (СК-95, проекция Гаусса – Крюгера). Они могут быть выбраны из списка в Базе данных ПО или определены и зада-

ны пользователем. Базы данных, как правило, содержат сведения о наиболее распространенных системах координат: здесь указываются параметры эллипсоида, характеристики проекции, параметры перехода от системы координат WGS-84 в референционную и обратно. В списке систем координат ПО ТВС имеется система СК-42 с эллипсоидом Красовского, но отсутствует СК-95. В данной практической работе предлагается выполнить уравнивание в созданной пользователем системе координат СК-95, с параметрами, приведенными в Стандарте [24].

Результаты уравнивания сети подвергаются статистическим тестам, описанным в практической работе № 2. Для успешного прохождения тестов, при настройках уравнивания следует ввести *ошибки центрирования и измерения высоты антенны*, соответствующие ошибкам планового и высотного положений пунктов в референционной системе координат.

Внешним контролем качества уравнивания может служить расхождение уравненных и исходных плановых координат контрольных точек (положения которых не фиксировались при уравнивании). Если расхождения попадают в доверительный интервал, задаваемый СКП, то уравнивание можно считать успешным. Если обнаружены «выбросы» в контрольных точках, то следует, по возможности, объяснить полученный результат, выполнить проверку исходных данных (в том числе ошибок ввода исходных координат пунктов в СК-95), уравнивать с другим набором опорных точек, если позволяет их количество.

В итоге уравнивания составляется отчет, содержащий уравненные координаты пунктов и другие сведения, перечисленные в описании практической работы № 2.

Методика выполнения работы

1. Создание проекта, настройка системы координат

В работе используются Проект и результаты минимально ограниченного уравнивания СГС из практической работы № 2. Для выполнения ограниченного уравнивания следует *изменить систему координат* проекта. Далее выбрать кнопку *Группа систем координат и зона*, с левой стороны отметить в списке *Russia CS42* (Coordinate System, СК-42), с правой стороны выбрать соответствующую зону.

Подключить в проект *модель квазигеоида EGM2008*.

В табл. 5.1 выписать свойства выбранной системы координат: параметры проекции, эллипсоид и его параметры, параметры перехода от WGS-84 к СК-42.

Сравнить параметры перехода для системы координат СК-42, заложенные в базе данных ПО с величинами, опубликованными в Стандарте [24].

Таблица 5.1

Параметры системы координат СК-42

Параметры перевода из WGS-84 в СК-42	δX , м	δY , м	δZ , м	ω_x , "	ω_y , "	ω_z , "	m , 10^{-6}
Параметры проекции	Эллипсоид			Долгота осевого меридиана, °	Смещение к северу, м	Смещение к востоку, м	Масштаб вдоль осевого меридиана
	Название	a , м	e				

В практической работе требуется получить координаты пунктов СГС в государственной системе координат СК-95. Эта система по сути своей является улучшенной и уточненной СК-42. Параметры перехода от общеземной системы к СК-95 близки, но не совпадают с параметрами для СК-42, заложенными в ПО. Поскольку уравнивание по МНК сводит поправки в координаты к минимуму, то ограниченное уравнивание локальной СГС с опорными координатами в СК-95, выполняемое в системе координат проекта СК-42, даст погрешности в положения пунктов не более чем погрешности наземных геодезических измерений.

В случаях, если требуется получить положения пунктов в местных, региональных системах координат, параметров которых нет в базе данных ПО, следует создать систему координат пользователя, с помощью утилиты *Coordinate System Manager*. Описание работы с утилитой приведено в прил. 4.

В работе необходимо с помощью утилиты *Coordinate System Manager* (см. прил. 4) создать систему координат пользователя СК-95, с параметрами перехода, приведенными в Стандарте [24].

С информацией о математических моделях и параметрах трансформирования студенты знакомятся при выполнении практической работы № 1 по дисциплине «Космическая навигация» [23].

2. Ограниченное уравнивание с фиксацией нескольких опорных пунктов в референционной системе координат

2.1. Задание нескольких пунктов государственной координатной основы как опорных

В Проекте на схеме сети выбрать пункт государственной плановой основы, вызвать правой кнопкой мыши контекстное меню *Свойства*. В окне *свойства* выбрать значок $\oplus$, ввести точные координаты в СК-95 и нормальные высоты из каталога, назначить им статус *Опорные* (Δ). Процедуру повторить для нескольких пунктов государственной координатной основы. Оставить несколько пунктов ГГС, не участвующих в уравнивании, в качестве контрольных.

Внимание: поскольку номер зоны уже выбран при назначении системы координат проекта, то первые две цифры ординаты не указываются при вводе точных координат.

2.2. Настройки уравнивания

При выполнении работы выбираются стандартные настройки уравнивания в ПО ТВС. В настройках проекта *СКО по умолчанию* задать в строке *GNSS* ошибку измерения высоты антенны и ошибку центрирования, соответствующие точности планового и высотного положения пунктов ГГС. Максимальное количество итераций при уравнивании, а также величину доверительной вероятности (95 %) оставить по умолчанию. Настройки уравнивания перечислить в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Настройки и результаты уравнивания

Настройки уравнивания	Значения	Результаты уравнивания	Значения
Ошибка центрир., м		Пройден ли с 1 раза тест χ^2 (да/нет)	
Ошибка измер. высоты антенны, м		Скалярный множитель (если выполнялось взвешивание)	
Максимальное количество итераций		Число степеней свободы (reference factor)	
Доверительная вероятность	95 %	Количество измерений, не прошедших тау-тест («выбросы»)	

2.3. Уравнивание и анализ результатов

Выбрать в главном меню опции *Съемка – Уравнивание*. Зафиксировать положение опорных пунктов ГГС в плане и по высоте (*2D и в*). Подтвердить команду *Уравнять*. В результате уравнивания должны быть успешно пройдены статистические тесты. Если этого не произошло, то следует выполнить процедуру *Взвешивание сети* и повторить уравнивание. Записать величину скалярного множителя в табл. 5.2.

Просмотреть отчет по уравниванию СГС (*Меню – Отчеты*). По виду эллипсов ошибок определить, равноточны ли уравненные координаты пунктов по всем трем направлениям. Найти пункты с максимальными СКП и, по возможности, объяснить причину больших ошибок на этих пунктах.

Записать значения уравненных координат и их СКП в табл. 5.3. Сюда же занести исходные координаты контрольных пунктов из каталога, посчитать разности с уравненными координатами.

Таблица 5.3

Уравненные координаты пунктов в СК-95

Идентификатор	x , м исходн.	x' , м уравн.	$x - x'$	m_x , м	y , м исходн.	y' , м уравн.	$y - y'$	m_y , м
...								

Сравнить разницы исходных и уравненных координат со средними квадратическими ошибками. Сделать выводы о наличии или отсутствии «выбросов». Сравнить результаты оценки точности в минимально ограниченном и ограниченном уравнивании. Объяснить причины расхождений.

Вычислить расстояния между тремя пунктами спутниковой геодезической сети (см. пункт 4 практической работы № 2) по уравненным прямоугольным пространственным координатам. К координатам (X, Y, Z) перейти от уравненных эллипсоидальных (B, L, H) по формулам (3) с параметрами эллипсоида Красовского.

Сравнить вычисленные расстояния с соответствующими длинами базовых линий. Составить разности и сравнить с СКП единичного измерения базовой линии из табл. 2.3. Результаты занести в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Сравнение расстояний между пунктами и углов
после ограниченного уравнивания

БЛ	Расст. выч., м	Расст. измер., м	Разность выч. – изм., м	СКП, м	Угол между изм. БЛ, о, "	Угол меж- ду уравни. БЛ о, "	Разность уравни. – изм., "
					—	—	—

Вычислить пространственный угол между двумя векторами базовых линий дважды: между измеренными и между уравненными векторами. Результаты, до 0,000 1", занести в табл. 5.4. Формулу для вычисления угла вывести самостоятельно из выражения для скалярного произведения двух векторов.

Сделать выводы, изменяются ли расстояния между пунктами и углы между направлениями после ограниченного уравнивания.

Отчет по практической работе № 5 должен содержать: все заполненные таблицы, схему спутниковой геодезической сети с указанием масштаба и отмеченными опорными и контрольными пунктами ГГС, подробный анализ результатов. Основной вывод по работе касается точности ограниченного уравнивания и деформаций локальной спутниковой геодезической сети после такого уравнивания.

Контрольные вопросы

1. В какой системе координат, как правило, выполняется ограниченное уравнивание?
2. Перечислить методы традиционных (наземных) координатных определений.
3. Исходные данные для уравнивания. Какое минимальное количество пунктов ГГС необходимо зафиксировать для выполнения ограниченного уравнивания?
4. Изменяется ли геометрия спутниковой геодезической сети после ограниченного уравнивания?

5. В результате какого уравнивания – минимально ограниченного или ограниченного – СКП координат получаются меньше? Почему?
6. Почему для достижения требуемой точности не достаточно перевода координат пунктов СГС в референцную систему с заданными в базе данных ПО параметрами трансформирования?
7. Порядок установления пользовательской системы координат при работе с утилитой *Coordinate System Manager*.
8. Параметры связи систем координат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Концепция развития отрасли геодезии и картографии до 2020 г. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 17 декабря 2010 г. № 2378-р [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/711931>
3. ГКИНП 01-006-03. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации. – М., 2004. – 28 с.
4. О единых государственных системах координат: постановление правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70192380/>
5. Струков А. А. Определение положения одного пункта в общеземной системе координат лучевым и сетевым способами по ГНСС-измерениям // 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. 72–77.
6. Trimble Business Center. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ww2.trimble.com/survey/trimble-business-center.aspx>
7. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 1: монография. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
8. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 2: монография. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.
9. Герасимов А. П. Спутниковые геодезические сети. – М.: ООО Изд-во «Проспект», 2012. – 175 с.
10. Непоклонов В. Б. Об использовании новых моделей гравитационного поля Земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2009. – № 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.credo-dialogue.com/journal.aspx>

11. Непоклонов В. Б. Об использовании новых моделей гравитационного поля Земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2009. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.credo-dialogue.com/journal.aspx>
12. Сугаипова Л. С. Сравнение современных моделей глобального гравитационного поля Земли // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 6. – С. 14–20.
13. An Earth Gravitational Model to Degree 2160 / N. K. Pavlis, S. A. Holmes, S. C. Kenyon, J. K. Factor // EGM2008/EGU General Assembly 2008. – Vienna, Austria, April 13–18, 2008.
14. Современные глобальные модели гравитационного поля Земли и их погрешности / В. Н. Конешов, В. Б. Непоклонов, Р. А. Сермягин, Е. А. Лидовская // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1. – С. 107–118.
15. Пеллинен Л. П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия). – М.: Недра, 1978. – 264 с.
16. Молоденский М. С. Основные вопросы геодезической гравиметрии // Труды ЦНИИГАиК. – 1945. – Вып. 42. – 106 с.
17. Молоденский М. С., Еремеев В. Ф., Юркина М. Я. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли // Труды ЦНИИГАиК. – 1960. – Вып. 131. – 251 с.
18. Еремеев В. Ф., Юркина М. Я. Теория высот в гравитационном поле Земли. – М.: Недра, 1971. – 144 с.
19. Телеганов Н. А., Елагин А. В. Высшая геодезия и основы координатно-временных систем: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 238 с.
20. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г. Современные проблемы физической геодезии: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 123 с.
21. Сурнин, Ю. В., Гиенко Е. Г., Кузьмин В. И. Некоторые результаты определения локального гравитационного поля на поверхности Земли // Вестник СГГА. – Вып. 11. – Новосибирск, 2006. – С. 8–13.
22. Сурнин, Ю. В., Гиенко Е. Г. Методика регулярного оценивания параметров взаимного трансформирования геодезических сетей, построенных спутниковым и традиционным методами // ГЕО-Сибирь-2008. IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). – Новосибирск: СГГА, 2008. Т. 1, ч. 1. – С. 262–266.
23. Антонович К. М. Космическая навигация. Ч. 2: сборник описаний лабораторно-практических работ. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 46 с.
24. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек. – М.: Стандартинформ, 2009. – 16 с.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ № 1

№ варианта	ID определяемого пункта	Активная спутниковая сеть	ID Пункты IGS
1	ISKT	АБС НСО	NOVM, NVSK
2	NSKW	АБС НСО	NOVM, NVSK
3	KOLV	АБС НСО	NOVM, NVSK
4	MHKV	АБС НСО	NOVM, NVSK
5	NSK1	ПДБС Новосибирск	NOVM, NVSK
6	PRD2	ПДБС Новосибирск	NOVM, NVSK
7	ISKT	АБС НСО	NRIL, ARTU
8	NSKW	АБС НСО	NRIL, ARTU
9	KOLV	АБС НСО	NRIL, ARTU
10	MHKV	АБС НСО	NRIL, ARTU
11	NSK1	ПДБС Новосибирск	NRIL, ARTU
12	PRD2	ПДБС Новосибирск	NRIL, ARTU
13	ISKT	АБС НСО	NRIL, IRKJ
14	NSKW	АБС НСО	NRIL, IRKJ

ПОРЯДОК ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ С САЙТОВ АКТИВНЫХ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ И IGS

1. Сеть активных базовых станций Новосибирской области, АБС НСО

Поддерживается Государственным бюджетным учреждением «Центр навигационных и геоинформационных технологий Новосибирской области», http://rtk.nso.ru/rtk_main.html.

Карта покрытия сети отображена на странице www.abs-nso.ru.

Для получения файлов измерений необходима специальная регистрация.

2. Сеть постоянно действующих станций г. Новосибирск, ПДБС Новосибирск

На сайте ОАО «Инжгеодезия» (www.geonsk.ru) на странице «ПДБС Разные сведения» содержится информация о сети постоянно действующих базовых станций, расположенных в Новосибирске и Бердске. Для получения файлов измерений необходимо зайти в личный кабинет с логином **qwertyui**, паролем **12345678**. Выполнить загрузку файлов со станций.

Внимание! Дата наблюдения содержится в названии файла, а не в дате размещения в сети (последняя, как правило, сутками позже). Файлы измерений находятся в открытом доступе в течение месяца.

К файлам наблюдений прилагается пояснительная записка в виде текстового документа, откуда следует выписать для определяемого пункта тип спутникового приемника, антенны, высоту антенны и способ ее измерения.

3. Координаты станций IGS на дату наблюдения с сайта <http://itrf.ign.fr/>

Определить номер домена или 4-символьный идентификатор из списка станций: **IERS Network – Network description** – получить текстовый файл с информацией о станциях **iers_sta_list.txt**. Пример: станция **arti** – идентификатор – **ARTU**, номер домена – **12362M001**.

Get ITRF coord (получить координаты, слева на странице); **selected points** (выбор точек); **add points to the cart** (добавить точку в карту); выбрать точку по номеру домена или по идентификатору; **add to cart** (добавить в карту); **display selected points** (вывод на экран информации о точке); **Get ITRF coordinates of these points** (получение координат этих точек); указать **эпоху** в требуемом формате (год, месяц, день); согласиться **ОК**; получить и распечатать/скопировать таблицу координат и скоростей точки на дату наблюдения.

При следующем обращении точки, добавленные в карту, автоматически в ней сохраняются; можно выбирать другие эпохи и получать координаты этих точек.

ОСНОВНЫЕ НАСТРОЙКИ ПРОЕКТА В ПО TRIMBLE BUSINESS CENTER

Проект – настройки проекта:

- 1) **Система координат** – выбрать по умолчанию (**WGS-84**)
(минимально ограниченное уравнивание)
или **изменить...**
(ограниченное уравнивание)
- 2) **Единицы** – настройка единиц измерения
GPS Время – местное время,
разница с Гринвичским временем (Временная поправка)
Координаты – метры
Расстояние – метры
- 3) **Настройки вычислений** –
GNSS-вектор: допустимая ошибка в плане – 0,05 м, по высоте – 0,08 м
- 4) **Обработка базовых линий – стандартные настройки**
Общее: модель антенны – определять автоматически
тип эфемерид – точные/бортовые/автоматически
Обработка: тип решения – фиксированное
частота – по нескольким частотам
вычислять невязки – да
Качество: критерии допустимости – использовать
дополнительные критерии допустимости
Спутники: маска по высоте (возвышения) – 15°
использовать все спутники
- 5) **Уравнивание сетей – стандартные настройки**
Общее: максимальное количество итераций – 10
Вывод ковариации: точность как отношение
Проект: изменить систему координат (при необходимости)
- 3) **СКО по умолчанию**
GNSS: СКО по умолчанию – задать паспортную точность прибора
Ошибка установки по умолчанию –
ошибка измерения высоты антенны – *указать*
ошибка центрирования – *указать*
Вывод доверительной вероятности – 95 %

ПОРЯДОК РАБОТЫ С УТИЛИТОЙ COORDINATE SYSTEM MANAGER В ПО TRIMBLE BUSINESS CENTER

Coordinate System Manager – отдельная утилита, обеспечивающая доступ к базе данных систем координат в ПО Trimble Business Center.

Подключение модели геоида

Подключение модели геоида из базы данных

1. Вызвать утилиту *Coordinate System Manager*.
2. Вкладка *Модели геоида* – выбор модели геоида из базы данных ПО.

Загрузка новой модели геоида в базу данных:

1. Файл с расширением *.ggf, содержащий новую модель геоида, поместить в папку, содержащую другие модели геоида с таким же расширением (ПОИСК на компьютере).
2. Вызвать утилиту *Coordinate System Manager*.
3. Главное меню – *Правка* – *добавить модель геоида* – дать название и выбрать файл с новой моделью геоида из списка.
4. *Сохранить изменения* в current.csd.

Добавление новой системы координат

1. Главное меню – *Правка* – *Добавить эллипсоид* – ввести параметры нового эллипсоида, если это необходимо. Эллипсоид Красовского уже есть в базе данных под именем *Krasovsky 1940*.
2. Главное меню – *Правка* – *Добавить группу систем координат*: дать имя группе СК.
3. *Правка* – *Добавить преобразование И.Г.Д.* (исходных геодезических дат) – *7 параметров* – *Создать новую группу переводов систем отсчета*. Указать имя группы СК, выбрать эллипсоид, направление перевода систем координат (в или из WGS-84), задать *7 параметров*.
4. *Правка* – *добавить систему координат* – задать параметры проекции. Для СК-42 – *поперечная проекция Меркатора* – параметры проекции *Гаусса – Крюгера*.
5. Сохранить изменения в Current.csd.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ № 3 И 4

Name	B	L	H	H' измер.
Вариант 1 – Колыванский район				
"1"	55°26'00,616"C	82°40'46,700"B	100,740	135,922
"2"	55°22'49,336"C	82°14'08,731"B	133,291	168,130
"3"	55°19'32,228"C	82°06'48,452"B	135,657	170,470
"5"	55°36'25,558"C	83°17'36,442"B	73,862	109,290
"6"	55°19'08,551"C	82°20'12,860"B	114,246	149,201
"7"	55°30'37,814"C	82°45'20,198"B	111,959	147,091
"8"	55°26'43,099"C	82°30'30,746"B	124,149	159,064
"9"	55°25'17,268"C	82°22'56,724"B	125,212	160,087
"10"	55°37'49,642"C	83°03'20,023"B	115,324	150,506
Вариант 2 – Коченевский район				
"11"	55°05'48,944"C	81°34'21,487"B	122,743	157,446
"12"	54°45'21,586"C	82°10'54,355"B	161,681	197,614
"13"	55°14'33,004"C	81°45'20,857"B	133,576	168,175
"14"	55°10'40,169"C	81°34'50,890"B	130,801	165,406
"15"	55°03'39,181"C	81°48'29,885"B	127,633	162,502
"16"	54°46'43,953"C	82°00'57,267"B	140,401	176,149
"17"	54°53'59,716"C	82°01'45,710"B	144,009	179,445
"18"	55°07'09,296"C	82°10'40,923"B	136,913	171,948
"19"	54°59'11,179"C	81°55'25,748"B	140,175	175,333
"20"	55°16'46,588"C	81°56'41,979"B	135,354	170,033
"21"	54°53'00,251"C	82°12'45,266"B	142,398	177,967
Вариант 3 – Новосибирский район				
"22"	54°55'30,097"C	82°33'55,514"B	113,917	149,632
"23"	54°41'03,714"C	82°35'13,224"B	95,062	131,280
"24"	54°36'07,043"C	82°46'41,271"B	123,899	160,475
"26"	55°09'25,879"C	82°45'45,508"B	66,558	102,180
"27"	54°53'29,383"C	83°08'35,717"B	161,131	197,100
"28"	54°55'52,427"C	82°50'49,175"B	103,381	139,238
"29"	55°05'22,000"C	83°17'51,922"B	212,037	247,641
"31"	54°57'26,517"C	83°18'31,836"B	153,690	189,571
"32"	55°08'35,504"C	82°23'05,481"B	102,082	137,310
"33"	54°56'01,269"C	82°59'20,901"B	77,163	113,011
"34"	55°03'29,432"C	83°20'11,362"B	194,891	230,609
"35"	54°35'45,176"C	83°01'49,301"B	194,296	230,948
"36"	54°52'05,188"C	82°49'31,934"B	132,972	168,933
"37"	54°57'28,592"C	83°29'26,159"B	280,048	315,870
"38"	55°01'02,735"C	82°31'22,052"B	84,477	120,039
"39"	55°08'47,118"C	82°54'01,412"B	89,907	125,496
"40"	54°41'26,882"C	83°08'36,927"B	168,356	204,798
"42"	54°41'31,158"C	82°28'03,531"B	132,187	168,319
"43"	54°48'58,540"C	82°36'17,097"B	120,516	156,431

Вариант 4 – Мошковский район				
"45"	55°38'14,388"C	83°50'37,527"B	178,541	214,010
"46"	55°21'27,615"C	83°36'16,679"B	174,147	209,710
"47"	55°20'12,570"C	83°46'53,735"B	182,081	217,719
"48"	54°58'41,772"C	83°43'51,295"B	258,819	294,589
"49"	55°22'56,816"C	83°22'22,276"B	126,502	162,025
"50"	55°05'57,712"C	84°06'05,871"B	244,948	280,769
"51"	55°16'20,358"C	83°15'40,335"B	183,388	218,887
"52"	55°10'45,404"C	83°27'14,142"B	186,438	222,064
"53"	55°26'20,153"C	83°59'20,822"B	179,495	214,988
"54"	55°18'30,553"C	83°56'50,679"B	201,936	237,539
Вариант 5 – Искитимский район				
"55"	54°30'40,279"C	83°01'44,330"B	220,408	257,353
"56"	54°33'24,394"C	83°42'27,628"B	262,382	299,252
"57"	54°45'08,821"C	83°36'58,463"B	256,216	292,570
"58"	54°35'32,263"C	83°12'48,137"B	162,396	199,090
"59"	54°37'40,568"C	83°48'19,665"B	188,112	224,838
"60"	54°17'23,048"C	82°57'19,958"B	262,174	299,629
"61"	54°40'44,476"C	83°41'37,382"B	209,549	246,168
"62"	54°24'22,879"C	82°41'31,115"B	210,587	247,589
"63"	54°33'22,122"C	83°23'37,502"B	191,268	228,236
Вариант 6 – Черепановский район				
"64"	54°05'47,268"C	83°38'31,945"B	205,488	243,668
"65"	54°16'25,196"C	83°08'30,969"B	261,094	298,785
"66"	54°08'31,783"C	83°19'33,649"B	241,530	279,515
"67"	54°24'42,273"C	83°14'18,878"B	202,435	239,753
"68"	54°18'45,884"C	83°17'20,406"B	262,984	300,498
"69"	54°06'43,810"C	83°09'59,316"B	246,983	284,851
"70"	54°07'39,696"C	82°54'54,455"B	236,522	274,342
"71"	54°17'02,244"C	83°28'05,235"B	266,943	304,434
"72"	54°01'03,475"C	83°28'02,823"B	175,216	213,511
"73"	54°17'23,048"C	82°57'19,958"B	262,218	299,599
"74"	54°20'13,053"C	83°41'16,435"B	289,717	327,125
"75"	54°11'38,283"C	83°01'54,034"B	223,505	261,340
"76"	54°13'29,639"C	83°17'51,447"B	261,789	299,427
Вариант 7 – Маслянинский район				
"78"	54°09'21,559"C	84°24'39,059"B	270,587	308,934
"79"	54°16'15,011"C	84°01'44,749"B	297,657	335,413
"80"	54°28'45,204"C	83°52'17,895"B	264,854	301,934
"81"	54°05'12,390"C	83°55'45,776"B	258,197	296,552
"82"	54°27'07,500"C	84°13'12,150"B	304,926	342,264
"83"	54°09'15,967"C	84°12'24,200"B	242,578	280,845
"84"	54°07'56,539"C	84°03'47,513"B	265,751	304,018
"85"	54°23'51,744"C	84°00'24,468"B	258,413	295,823
"86"	54°15'36,032"C	83°52'32,833"B	300,177	337,889

Вариант 8 – Сузунский район				
"87"	53°54'27,949"C	81°59'39,744"B	190,308	228,754
"88"	53°59'41,261"C	82°07'06,360"B	232,145	270,357
"89"	54°10'44,595"C	82°22'26,479"B	214,326	251,760
"91"	54°06'13,260"C	82°11'48,685"B	248,313	286,065
"92"	54°00'01,804"C	81°59'42,169"B	244,327	282,476
"93"	53°45'13,916"C	81°59'24,596"B	107,469	146,287
"94"	53°36'20,697"C	82°21'14,179"B	128,016	166,913
"95"	54°09'53,199"C	82°37'23,250"B	264,864	302,486
"96"	54°05'04,312"C	82°31'10,447"B	236,298	274,210
"97"	54°04'26,673"C	82°47'07,881"B	199,396	237,435
Вариант 9 – Ордынский район				
"98"	54°16'02,393"C	81°28'04,769"B	177,732	215,100
"99"	54°25'41,762"C	81°48'14,608"B	165,757	202,548
"100"	54°32'06,010"C	82°14'25,864"B	129,061	165,625
"101"	54°22'18,248"C	81°12'21,665"B	178,362	215,163
"102"	54°37'15,049"C	81°30'57,441"B	158,466	194,520
"103"	54°39'20,495"C	82°18'52,719"B	143,273	179,544
"104"	54°35'54,353"C	81°57'32,884"B	178,777	215,092
"105"	54°21'48,993"C	82°22'07,256"B	168,402	205,368
"107"	54°19'59,257"C	81°38'26,152"B	150,044	187,148
"108"	54°47'07,329"C	81°52'06,556"B	157,424	193,197
"109"	54°17'12,186"C	82°14'36,609"B	204,753	241,870
Вариант 10 – Кочковский район				
"110"	54°41'01,317"C	80°29'26,625"B	111,662	147,568
"111"	54°35'26,450"C	80°55'38,482"B	154,001	189,920
"112"	54°39'18,049"C	80°18'05,658"B	113,264	149,338
"113"	54°04'51,441"C	80°37'21,143"B	190,793	228,929
"114"	54°06'40,602"C	80°04'50,777"B	122,087	160,079
"115"	54°24'40,632"C	80°39'54,479"B	139,926	176,525
"116"	54°21'19,186"C	81°02'29,318"B	165,599	202,333
"117"	54°21'53,401"C	80°24'39,026"B	141,896	178,752
"118"	54°18'29,242"C	80°14'23,296"B	138,127	175,267
"119"	54°31'14,007"C	80°40'11,130"B	137,570	173,769
"120"	54°12'05,124"C	80°20'56,268"B	129,961	167,584
"121"	54°18'04,912"C	80°40'35,628"B	135,465	172,499
Вариант 11 – Чулымский район				
"122"	55°08'51,364"C	80°35'45,370"B	112,551	147,730
"123"	54°54'35,277"C	80°49'00,217"B	116,383	151,587
"125"	54°49'20,403"C	81°13'01,207"B	125,793	161,202
"126"	55°03'05,076"C	80°54'27,749"B	116,989	152,038
"127"	55°03'56,530"C	80°40'56,357"B	106,026	141,137
"128"	54°48'30,887"C	81°30'01,462"B	151,819	187,390
"129"	55°10'03,056"C	80°58'24,391"B	106,322	141,251
"130"	55°25'47,350"C	80°34'30,015"B	102,263	137,302
"131"	54°45'37,937"C	80°34'35,950"B	112,627	148,288
"132"	55°08'14,963"C	81°24'22,129"B	127,374	162,108
"133"	54°52'28,261"C	80°16'57,411"B	95,206	130,842

Вариант 12 – Каргатский район				
"134"	54°49'21,675"C	80°10'09,639"B	99,886	135,820
"135"	55°14'21,010"C	80°33'37,587"B	100,989	136,333
"136"	55°13'48,477"C	79°44'46,784"B	114,520	150,030
"137"	55°31'31,977"C	79°53'04,680"B	101,754	136,531
"138"	55°12'45,504"C	80°22'17,538"B	98,721	134,016
"139"	55°21'18,589"C	80°04'43,289"B	105,878	140,921
"140"	55°31'14,730"C	80°27'14,701"B	103,453	138,369
"141"	55°08'12,549"C	80°06'31,191"B	96,262	131,701
"142"	55°26'15,763"C	80°24'01,104"B	110,908	145,101
"143"	55°06'31,621"C	80°20'19,706"B	111,306	146,710
"144"	55°15'28,936"C	80°00'21,010"B	111,161	146,420
Вариант 13 – Убинский район				
"146"	55°22'27,270"C	79°06'38,233"B	101,515	136,366
"147"	55°20'02,033"C	79°53'13,383"B	107,208	142,307
"148"	55°23'52,779"C	79°45'26,914"B	103,318	138,380
"149"	55°37'56,382"C	79°05'28,642"B	93,641	127,925
"151"	55°35'04,374"C	79°31'58,167"B	101,259	135,906
"152"	55°17'22,133"C	79°14'37,873"B	109,987	145,064
"153"	55°29'02,168"C	79°30'20,853"B	100,187	135,037
"154"	55°23'56,031"C	79°31'52,180"B	102,008	137,054
"155"	55°38'32,927"C	79°40'00,993"B	98,845	133,344
"156"	55°11'37,989"C	79°33'30,915"B	108,723	144,179
"157"	55°02'41,473"C	79°46'57,358"B	92,696	128,325
Вариант 14 – Барабинский район				
"158"	55°29'56,669"C	78°24'24,993"B	92,790	127,026
"159"	55°12'18,551"C	78°37'42,873"B	94,232	129,038
"160"	55°10'33,432"C	78°29'25,282"B	90,519	125,279
"161"	55°02'28,445"C	78°15'58,621"B	86,140	120,107
"162"	55°14'57,357"C	78°01'01,084"B	87,084	121,198
"163"	55°13'10,886"C	79°00'41,831"B	97,349	132,422
"164"	55°42'14,856"C	78°03'48,064"B	88,950	122,554
"166"	55°33'18,977"C	78°48'28,624"B	90,378	124,835
"167"	55°30'47,840"C	77°59'52,217"B	84,772	118,533
"168"	55°46'10,216"C	78°21'51,155"B	93,824	127,559
"169"	55°20'27,506"C	77°36'39,617"B	76,705	110,450
Вариант 15 – Здвинский район				
"170"	54°54'22,610"C	79°04'11,409"B	87,674	123,307
"171"	54°46'47,715"C	78°31'13,641"B	84,928	120,637
"172"	54°32'56,551"C	78°37'34,842"B	84,915	121,340
"173"	54°19'32,249"C	78°01'50,439"B	78,609	115,226
"174"	54°42'53,864"C	78°13'13,970"B	82,192	117,914
"175"	54°22'57,057"C	78°53'19,390"B	82,964	119,963
"176"	54°25'02,106"C	78°42'56,682"B	83,256	120,151
"177"	54°54'36,240"C	78°49'07,565"B	82,927	118,519
"178"	54°48'20,390"C	78°57'11,308"B	81,214	117,021
"179"	54°54'55,804"C	78°14'34,034"B	77,546	112,695
"180"	54°34'03,909"C	78°18'32,535"B	75,290	111,483
"181"	55°02'09,005"C	78°42'45,189"B	78,036	113,242

Вариант 16 – Доволенский район				
"182"	54°21'09,707"C	79°10'43,417"B	89,538	126,551
"183"	54°32'19,355"C	79°35'56,231"B	106,516	143,292
"184"	54°30'28,943"C	79°31'00,868"B	100,302	137,152
"185"	54°14'08,372"C	80°01'27,084"B	137,763	175,166
"186"	54°46'03,461"C	79°58'19,419"B	92,037	128,125
"187"	54°36'07,334"C	78°56'21,022"B	81,371	117,728
"189"	54°23'10,095"C	79°46'52,360"B	112,301	149,380
"190"	54°07'28,010"C	79°19'36,028"B	102,077	139,723
"191"	54°27'06,033"C	79°27'43,756"B	97,283	134,156
"192"	54°08'45,945"C	79°42'55,215"B	136,171	173,857
"193"	54°48'14,190"C	79°46'00,237"B	89,439	125,516
Вариант 17 – Красноозерский район				
"194"	54°06'42,621"C	79°09'11,523"B	99,279	136,843
"195"	54°00'10,643"C	79°18'22,807"B	122,657	160,651
"196"	54°12'46,562"C	78°41'46,999"B	81,429	118,903
"197"	53°51'12,849"C	78°46'41,930"B	91,634	129,549
"198"	53°47'49,025"C	79°15'15,874"B	130,129	168,513
"199"	53°58'01,976"C	78°52'41,375"B	93,113	130,861
"200"	54°14'45,506"C	79°40'30,833"B	120,240	157,708
"201"	53°43'09,677"C	78°49'32,339"B	98,832	136,888
"202"	53°53'47,583"C	79°38'33,245"B	143,288	181,970
"203"	53°56'01,628"C	79°47'07,275"B	143,198	181,931
"204"	53°36'50,042"C	79°32'47,050"B	100,793	139,824
"205"	54°11'15,486"C	78°53'26,213"B	81,579	119,033
Вариант 18 – Болотненский район				
"206"	55°43'51,521"C	84°05'22,522"B	165,706	201,076
"207"	55°48'51,793"C	84°20'55,233"B	186,393	221,951
"209"	55°36'28,085"C	84°07'12,801"B	187,871	223,297
"210"	55°40'59,792"C	83°56'54,001"B	171,142	206,479
"211"	55°44'47,585"C	84°26'57,828"B	169,163	204,683
"212"	55°28'04,264"C	84°24'58,103"B	226,106	261,604
"213"	55°37'33,810"C	84°15'51,043"B	190,269	225,771

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ ПУНКТОВ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ

Таблица П.6.1

Каталог координат пунктов ГГС и ГНС
Система координат – условная СК-42
Система высот – условная БСВ-77

Название, тип, класс	$x, м$ $y, м$	$H', м$	$\varphi,$ λ $^{\circ} ' ''$	a^* $^{\circ} ' ''$ на пункт
Алексеевка, п. тр. 1-го кл., IV кл., Лапласа 1-го кл.	6 090 052,15 14 600 399,81	149,637	54 55 27,50 82 33 58,98	334 39 02,93 На п. тр. Кремлевка
Кремлевка п. тр. 1-го кл., IV кл., Лапласа 1-го кл.	6 114 093,21 14 588 343,44	137,28	55 08 32,90 82 23 12,86	154 30 11,22 На п. тр. Алексеевка

Таблица П.6.2

Координаты пунктов
из уравнивания спутниковой геодезической сети
Система координат WGS-84

Пункт	$B, ^{\circ} ' ''$	$L, ^{\circ} ' ''$	$H, м$	$A, ^{\circ} ' ''$, на пункт	$Z, ^{\circ} ' ''$, на пункт
Alex	54 55 30,098347	82 33 55,492405	113,537	334 38 58,214 На п. Krem	90 08 45,27 На п. Krem
Krem	55 08 35,507556	82 23 05,460379	101,721	154 30 05,517 На п. Alex	90 05 44,01 На п. Alex

Учебное издание

Гиенко Елена Геннадиевна

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ

Редактор *Е. К. Деханова*
Компьютерная верстка *Л. Н. Шиловой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 15.12.2014. Формат 60 × 84 1/16.
Усл. печ. л. 3,95. Тираж 100 экз. Заказ .
Гигиеническое заключение
№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.
Редакционно-издательский отдел СГГА
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА
630108, Новосибирск, 108, Плахотного, 8.