

ПРЕДИСЛОВИЕ

Этот учебник — результат обобщения авторами своего опыта, как преподавательского, так и производственного в своих областях. Мы надеемся на то, что книга будет полезна студентам, поскольку доступно объясняет сложный материал, которому в учебном процессе в настоящее время уделяется недостаточно внимания. Надеемся, что она будет полезна и производственникам и позволит им понять современные тенденции в развитии геодезии и маркшейдерии.

Практическая часть учебника может быть полезна как пример и методическое руководство при выполнении сложных инженерно-геодезических работ, создании локальных инженерных сетей, мониторинге большепролетных сооружений и в промышленности. Кроме того, с практической точки зрения показано, как можно решить задачи промышленной геодезии, моделирования геометрии и работы оборудования и его оптимальной корректировки. Эта информация о геометрических параметрах промышленных агрегатов является очень важной для принятия взвешенных управляющих решений всеми службами предприятий. И наконец, материал книги должен помочь в анализе и выборе программного обеспечения для решения маркшейдерских задач и задач промышленной геодезии.

Маркшейдерские сети рассматриваются как частный случай инженерных геодезических сетей с особенностями их методики развития и применяемых методов.

На самом деле в создании рукописи принимали участие многие коллеги, аспиранты и студенты университетов, которые помогали готовить иллюстрации. Авторы выражают им свою благодарность и признательность.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие инженерной геодезии в промышленности связано с двумя революционными технологиями, первая — это появление лазерных дальномеров, что позволило кардинальным образом изменить технологию измерения расстояний и снизить их трудоемкость. Второе — это появление компьютеров и микропроцессоров. Микропроцессоры стимулировали развитие измерительных приборов — появились электронные тахеометры, которые позволяли значительно упростить и автоматизировать геодезические и маркшейдерские измерения и повысить их точность. Использование компьютеров для обработки измерений привело к изменению методов обработки маркшейдерских и геодезических измерений и переходу от ручных методов обработки и уравнивания к строгому методу наименьших квадратов. К этому этапу относится появление и бурное развитие маркшейдерских гидрокомпасов и методов их применения для повышения точности маркшейдерских сетей.

Еще одна революционная технология, изменившая работу геодезиста и маркшейдера на земной поверхности, — это появление глобальных навигационных спутниковых систем. Сейчас построение локальных геодезических сетей предприятий невозможно представить без спутниковых измерений и технологий. Эти технологии оказались настолько удобными и универсальными, что стали большей частью инженерной геодезии и маркшейдерии. Развитие сетей постоянных базовых станций обеспечило огромные территории высокоточным координатным пространством, на котором координаты определяются в режиме реального времени с очень высокой точностью. Другой перспективной тенденцией в области ГНСС-технологий стала возможность получения высокоточных пространственных координат методом точного точечного позиционирования в режиме реального времени, что, в свою очередь, может быть применено как новый мощный инструмент в задачах мониторинга инженерных сооружений.

Первые двадцать лет XXI в. характеризуются еще одним качественным скачком маркшейдерского и геодезического приборостроения. Появились новые приборы и технологии обработки. В первую очередь это лазерные сканеры и сканирующие тахеометры, которые позволяют получать огромные массивы измерений в цифровом виде. Программное обеспечение для обработки облаков точек лазерного сканирования тоже совершенствовалось и сейчас достигло уровня автоматической сшивки облаков и выделения геометрических объектов по этим облакам. Еще далеко не все задачи решены, но прогресс программного обеспечения очевиден и имеется тенденция к использованию методов искусственного интеллекта при решении инженерных геодезических задач.

Еще одна область инженерной геодезии испытывает бум — это использование беспилотных летательных аппаратов для съемок открытых горных работ, отвалов и складов. Преимущество не столько в съемке, хотя применение БПЛА снизило стоимость аэрофотосъемки на несколько порядков, сколько в её автоматической обработке. В последнее время появилось программное обеспечение, основанное на алгоритме масштабно-инвариантного преобразования признаков, которое позволяет выполнить обработку аэросъемки в автоматическом режиме и получить цифровую модель объекта. Причем детальность и точность трехмерных моделей приближается к лазерному сканированию. Однако и здесь есть проблемы, так как для маркшейдерских задач точность определения высот недостаточна и требуется создание сети опознаков для выполнения процедуры внешнего ориентирования снимков. Безусловно, технология съёмки объектов с помощью БПЛА очень перспективная и, возможно, в ближайшем будущем будет доведена до точности, необходимой в маркшейдерии. Появляются и совершенно новые технологии в маркшейдерии. Так, для наблюдения за сдвижением бортов карьеров применяется технология интерференционного радарного сканирования, которая на удивление быстро нашла распространение на карьерах и в разрезах в РФ. Интерференционное радарное сканирование также дает огромные объемы цифровой информации. Поэтому нынешний этап развития инженерной геодезии как науки правильно характеризовать как «цифровая геодезия», как по виду получаемых измерений, так и по её дальнейшему использованию в цифровом виде в геоинформационных или горных информационных системах и системах автоматизированного проектирования.

Информация на аналоговых носителях практически не используется, но, отдавая дань традиции и устаревшим требованиям, хранится в архивах в бумажном виде. Особенно это характерно для маркшейдерии. Вопросы хранения больших объемов маркшейдерской цифровой информации пока не отрегулированы законодательно, до сих пор отмененная инструкция [1] и действующая [2] регламентируют хранение маркшейдерских измерений и чертежей в бумажном виде в специальных помещениях. Эти документы входят в противоречие практикой маркшейдерских измерений и цифровых моделей горных работ, поэтому цифровая маркшейдерская информация хранится на локальных компьютерах маркшейдерских отделов. В лучшем случае на сервере локальной сети предприятия, в этом случае хотя бы периодически выполняется резервное копирование информации. Лишь на отдельных предприятиях функционируют системы электронного документооборота, в которых реализованы современные методы защиты информации. Для банков и финансовых организаций требования к защите информации определены в виде национальных стандартов [3], видно, и в области геодезии и маркшейдерии это произойдет, потому что очевидна необходимость хранения маркшейдерской информации о действующих, отработанных и

законсервированных горных предприятиях. Технически это возможно уже сейчас, облачные хранилища и обработка данных уже сейчас широко используются, однако без законодательного закрепления обязательности хранения цифровой маркшейдерской информации собственники предприятий не будут вкладывать средства в её хранение.

Достаточно условно маркшейдерия делится на маркшейдерию на поверхности и подземную маркшейдерию. Различие обусловлено спецификой выполняемых работ и методов. Так, для маркшейдерии на поверхности доступны все методы и технологии, применяемые в геодезии. Для съемок объектов открытых горных работ и инженерных изысканий под строительство маркшейдерские службы могут использовать различные технологии и методы:

- ГНСС-приемники в режиме RTK;
- тахеометрическую съемку электронными тахеометрами;
- аэросъемку БПЛА;
- наземное и (или) воздушное лазерное сканирование.

Выбор технологии определяется объемом работ, наличием инструментов на предприятии и технико-экономическими условиями для выполнения работ.

Для создания локальных маркшейдерских и геодезических сетей, съемки небольших участков и выноски объектов чаще используются ГНСС-приемники в режиме RTK и реже электронные тахеометры. Для съемки больших объектов применяется аэросъемка БПЛА и воздушное лазерное сканирование, а для создания цифровых моделей сложных промышленных объектов — наземное лазерное сканирование.

С маркшейдерским обеспечением подземных работ все сложнее. Впервые, из-за специфики маркшейдерских опорных сетей, которые развиваются исключительно методом полигонометрии. На шахтах и рудниках, не опасных по взрыву газа и пыли, можно использовать любое геодезическое и специальное маркшейдерское оборудование, и достаточно эффективно применяются и электронные тахеометры, и гироскопические насадки на них, и новый вид «маркшейдерских» сканеров для съемки выработок и пустот, ультразвуковые глубиномеры для скважин, а также другое современное электронное оборудование. На угольных шахтах, опасных по взрыву газа и пыли, ситуация несколько другая. Хотя в 2013 г. появился первый электронный тахеометр во взрывобезопасном исполнении на базе электронного тахеометра Leica TS06, однако на сегодняшний день не все шахты Кузнецкого угольного бассейна имеют такие тахеометры в маркшейдерских отделах. С гироскопами дело обстоит еще хуже, до сих пор гироскопические ориентировки производятся приборами, выпущенными в 1975–1985 гг.

Дистанционное образование, которое очень простимулировала пандемия, значительно снизило уровень подготовки студентов. Очень немногие лекционные дисциплины можно читать дистанционно. А практические

работы с маркшейдерскими и геодезическими инструментами не заменят никакие видеолекции. К этому добавляется дефицит учебников и учебных пособий, при современной нагрузке на профессорско-преподавательский состав просто не остается времени на написание учебников. Последние учебники по маркшейдерии выходили в 2010–2012 гг., просто исключением является монография [5] о маркшейдерском обеспечении разработки месторождений нефти и газа.

Инструкция по производству маркшейдерских работ [1] отменена с 01.01.2021, пока её не заменили новым документом, предусмотрена разработка федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила производства маркшейдерских работ». Надеемся, что этот документ не будет жестко регламентировать производство маркшейдерских работ, как это было в предыдущих инструкциях. Для своего времени инструкция 1985 г. была достаточно адекватным документом, который отражал состояние развития методов и инструментов в маркшейдерии и на законодательном уровне содержал опыт маркшейдерской службы угольной отрасли. Технологии и инструменты для выполнения маркшейдерских работ совершенствовались, однако инструкция 2003 г. [1] повторила жесткую регламентацию предыдущей инструкции, добавив раздел об обязательных геодезических полигонах при разработке месторождений нефти и газа. Этот раздел критиковался многими, потому что в условиях Западной Сибири целесообразность таких полигонов на всех без исключения месторождениях неочевидна.

Хочется надеяться, что новые нормативные документы в маркшейдерии не будут жестко регламентировать методику выполнения маркшейдерских работ, а позволят маркшейдерам обосновывать методику, инструменты и точность выполняемых работ.

После долгого вступления определим, для кого эта книга. В первую очередь для студентов и специалистов, которые понимают, что они недополучили по какой-то причине часть знаний в своем образовании. Для них кратко рассматриваются теоретические вопросы, без которых невозможно понимание следующей части книги. Основной задачей авторы считали показать, как применить полученные знания для достижения наилучшего технического результата. Как обосновать выбор инструментов и методики измерений при выполнении работ, которые не регламентируются инструкциями и СНИПами. А в практике геодезического и маркшейдерского обеспечения производства такие задачи возникают все чаще — приходит техническая документация на строительство объекта с очень высокой точностью установки оборудования, и маркшейдеру или геодезисту требуется выбрать инструмент и методику измерений для достижения необходимого технического результата.

Книга не охватывает весь объем инженерной геодезии и маркшейдерии, а только основные работы, связанные с созданием локальных опорных

сетей геодезическими и спутниковыми методами, их уравниванием, проектированием и предварительным расчетом точности. Авторы старались продемонстрировать свое видение обоснования методики инженерных геодезических и маркшейдерских работ на примерах различных сетей и объектов.

Литература к введению

1. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ / НТЦ «Промышленная безопасность» // Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль. Сер. 07. — 2004. — Вып. 15. — М. : Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004. — 120 с.

2. РД 07-226-98. Инструкция по производству геодезическо-маркшейдерских работ при строительстве коммунальных тоннелей и инженерных коммуникаций подземным способом (утв. Постановлением Госгортехнадзора РФ от 24.12.1997 № 54, ред. от 27.06.2002).

3. ГОСТ 57580.1-2017. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Базовый состав организационных и технических мер (утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 08.08.2017 № 822-ст).

4. ГОСТ 57580.2-2018. Безопасность финансовых (банковских) операций. Защита информации финансовых организаций. Методика оценки соответствия (введ. 01.09.2018).

5. Болонская система образования в России. — URL: <https://edunews.ru/education-abroad/sistema-obrazovaniya/bolonskaya.html>.

6. Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений нефти и газа / Ю. А. Кашников, К. В. Беляев, Е. С. Богданец [и др.]. — М. : Издат. дом «Недра», 2018. — 454 с.

1. ГЛОБАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОДЕЗИИ И МАРКШЕЙДЕРИИ

1.1. Координатные системы отсчёта, системы координат и высот в геодезии и маркшейдерии и их связь

Координатные системы отсчёта и системы координат в геодезии и маркшейдерии. Для решения практических задач, возникающих в геодезии и маркшейдерии, приходится использовать разнообразные координатные системы отсчёта, системы координат и высот. Такое разнообразие применяемых систем обусловлено, прежде всего, тем, что основным инструментом получения геопространственных данных в настоящее время являются космические методы, в частности метод ГНСС-технологий.

В ГНСС-технологиях в качестве координатной основы используются геоцентрические общеземные (глобальные) координатные системы отсчета, в которых определяются положения станций слежения. Так, в работе [9] приводится следующее описание координатной системы отсчёта: «это система координат, связанная с Землей исходной геодезической датой». Под *исходной геодезической датой* (datum) следует понимать набор параметров, описывающих связь координатной системы с Землей. Эти параметры определяют положение начала, масштаб и ориентировку осей системы координат по отношению к Земле.

Системой координат, или координатной системой, называют набор математических правил, описывающих, как координаты должны быть соотнесены с точками пространства [9]. В описании системы координат указывается положение начала, основные плоскости, или отсчетная поверхность, а также направления координатных осей.

Физическая реализация координатной системы отсчета производится через геодезическую отсчетную основу (reference frame), которая представляет собой совокупность геодезических пунктов (или иных объектов — носителей координат) и соответствующих значений координат. В настоящее время практически все координатные системы отсчета имеют по несколько реализаций отсчетных основ, относящихся к разным эпохам, отличающихся количеством пунктов и точностью взаимных положений [9].

Для решения глобальных задач используются прямоугольные пространственные системы координат (X, Y, Z), а также геодезические, которые задаются с помощью трех компонент: геодезической долготы (L), геодезической широты (B) и геодезической высоты (H).

На рисунках 1.1 и 1.2 показаны:

- пространственная прямоугольная геоцентрическая система координат;
- геодезическая геоцентрическая система координат.

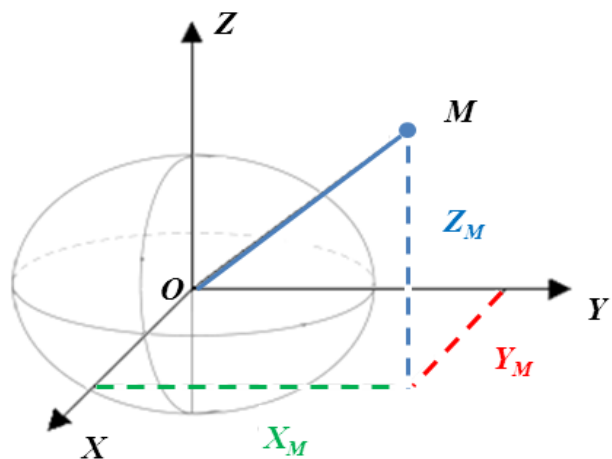


Рис. 1.1. Пространственная прямоугольная геоцентрическая СК

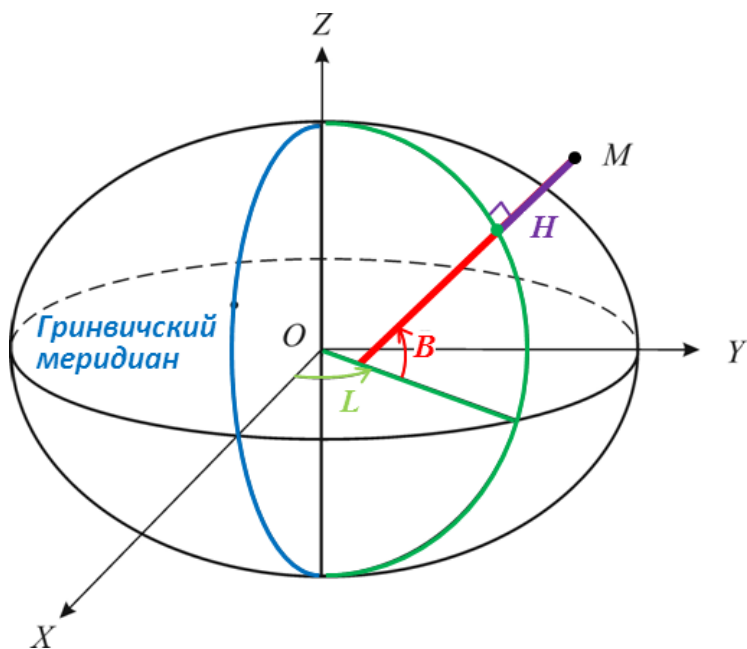


Рис. 1.2. Геодезическая геоцентрическая СК

Связь между пространственными прямоугольными и геодезическими координатами осуществляется по следующим формулам [41, 71]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L \\ (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L \\ (N \cdot (1 - e^2) + H) \cdot \sin B \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (1.2)$$

где N — радиус кривизны эллипсоида в первом вертикале, м; a — большая полуось общеземного эллипсоида, м; e — эксцентриситет эллипсоида.

При переходе от прямоугольных координат к геодезическим определение долготы выполняется по формуле

$$L = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right). \quad (1.3)$$

При определении широты применяют итеративный процесс (один из вариантов). Находят геодезическую широту B по формуле

$$B^{(i)} = \arctg\left(\frac{Z + N^{(i-1)} \cdot e^2 \cdot \sin B^{(i-1)}}{D}\right), \quad (1.4)$$

где i — номер итерации, повторяющийся до тех пор, пока будет выполняться условие $|B^i - B^{(i-1)}| \geq \varepsilon$ (ε — некоторая точность вычислений); D — проекция радиус-вектора на плоскость экватора, которая определяется как $D = \sqrt{X^2 + Y^2}$.

Величина $N^{(i-1)}$ находится по широте из предыдущего приближения. Эллипсоидальная высота H определяется по формуле

$$H = \frac{Z}{\sin B} - N \cdot (1 - e^2). \quad (1.5)$$

Геодезическую широту можно вычислить по формуле Боуринга:

$$\operatorname{tg} B = \frac{Z + a \cdot e \cdot e' \cdot \sin^3 \theta}{D - a \cdot e^2 \cdot \cos^3 \theta}, \quad (1.6)$$

в которой $e' = \frac{e}{\sqrt{1 - e^2}}$ — второй эксцентриситет, а вспомогательный угол θ находится из выражения

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{Z}{D \cdot \sqrt{1-e^2}}. \quad (1.7)$$

Наибольшая ошибка определения широты этим методом не превосходит 0,002" [37].

В космической геодезии применяются следующие трёхмерные координатные системы отсчета:

- Параметры Земли 1990 г. — ПЗ-90 (Россия);
- Государственная система координат 2011 — ГСК-2011 (Россия);
- Мировая геодезическая система 1984 г. — WGS-84 (США);
- Опорная земная система отсчёта Galileo — GTRS (Европейский союз);
- Китайская геодезическая система координат 2000 г. — CGCS2000 (Китайская Народная Республика);
- Международная земная система отсчета ITRS (Международная служба вращения Земли и систем отсчета, МСВЗ), а также многие другие.

Остановимся более подробно на следующих координатных системах отсчета: ПЗ-90, ГСК-2011, WGS-84, а также ITRS.

Координатная система отсчёта ПЗ-90 была получена по результатам почти 30 млн фотографических, радиодальномерных, доплеровских, лазерных и альтиметрических измерений со спутника ГЕО-ИК с привлечением радиотехнических и лазерных измерений дальностей до спутников системы ГЛОНАСС и «Эталон» Топографической службой Вооруженных сил Российской Федерации.

Параметры ПЗ-90 включают:

- фундаментальные астрономические и геодезические постоянные;
- характеристики координатной основы (параметры земного эллипсоида вращения, координаты пунктов, закрепляющих систему, параметры связи с другими системами координат);
- планетарные модели нормального и аномального гравитационных полей Земли, локальные характеристики гравитационных полей (высоты геоида над общим земным эллипсоидом и аномалии силы тяжести).

Начало системы расположено в центре масс Земли. Ось Z направлена к среднему Северному полюсу на среднюю эпоху 1900–1905 гг. (МУН). Ось X лежит в плоскости земного экватора эпохи 1900–1905 гг., и плоскость XOZ определяет положение нуль-пункта принятой системы счета долгот. Ось Y дополняет систему координат до правой тройки векторов. Спутниковая геоцентрическая система координат закреплена на территории Содружества Независимых Государств (СНГ) координатами 30 опорных пунктов космической геодезической сети (КГС) со средними расстояниями 1–3 тыс. км. Точность взаимного положения пунктов характеризуется погрешностями в 10, 20 и 30 см для расстояний соответственно в 100, 1000 и 10 000 км. Погрешности привязки координатной системы отсчёта ПЗ-90 к

центру масс Земли по абсолютной величине не превышают 1,5 м. Планетарные модели гравитационного поля Земли получены в виде разложений в ряд по сферическим функциям до 36-й и 200-й степени и порядка, а также в виде системы точечных масс. Средняя квадратическая погрешность высоты геоида над эллипсоидом равна 1,5 м [68].

В 2002 г. была выполнена первая модернизация координатной системы отсчёта ПЗ-90, получившая обозначение ПЗ-90.01. Для ее вывода использовался большой объем измерительной информации КГК ГЕО-ИК, полученной после 1990 г., не вошедшей в обработку при выводе ПЗ-90, и высокоточные измерения на пунктах КГС, полученных с использованием ГНСС-оборудования. Начало ПЗ-90.02 расположено в центре масс Земли. Ось Z в соответствии с рекомендациями МСВЗ направлена в условный земной полюс, ось X направлена в точку пересечения плоскости экватора и нулевого меридиана, установленного МСВЗ и Международным бюро времени. Y дополняет систему координат до правой тройки векторов.

При модернизации системы геодезических параметров «Параметры Земли 1990 г.» в 2002 г. (ПЗ-90.02) точность геоцентрического положения пунктов КГС была доведена до уровня 0,3–0,5 м при точности взаимного положения пунктов 0,02–0,03 м [33].

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.06.2007 № 797-р в целях повышения тактико-технических характеристик глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС принята к использованию уточненная версия государственной геоцентрической системы координат — Параметры Земли 1990 г. [61].

Второе уточнение государственной геоцентрической системы отсчёта Параметры Земли 1990 г. выполнено в 2011 г. (ПЗ-90.11) с использованием большого объема высокоточных измерений ГЛОНАСС/GPS с пунктов КГС и ряда пунктов сети Международной ГНСС-службы (МГС). Новым технологическим решением в вопросе уточнения координатной системы отсчёта ПЗ-90.11 было включение в обработку рядов измерительной информации доплеровской спутниковой сети DORIS 2002, 2008 и 2010 гг. [50]. На рисунке 1.3 показаны пункты КГС, IGS и DORIS на территории Российской Федерации, на которых определены их координаты в координатной системе отсчёта ПЗ-90.11.

Точность установления геоцентрической системы координат ПЗ-90.11 по отношению к центру масс Земли характеризуется средней квадратической погрешностью на уровне 0,05 м, а для направления осей системы координат — на уровне 0,001". СКП взаимного положения пунктов составляет 0,005–0,01 м. Точность определения масштаба системы координат соответствует современному уровню знаний о значениях скорости света, геоцентрической гравитационной постоянной, а также точности лазерных измерений, которая характеризуется СКП 0,001–0,005 м [62].



Рис. 1.3. Схема расположения пунктов КГС, IGS и DORIS на территории Российской Федерации [62]

Данная модифицированная система координат была введена на территории Российской Федерации Постановлением Правительства Российской Федерации от 28.12.2012 № 1463 «О единых государственных системах координат» [55].

Государственная система координат 2011. Государственная система координат 2011 должна была быть введена согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 28.12.2012 № 1463 [55], но её введение было отложено на 01.01.2021. В конце 2020 г. вышел приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии [58], в котором описан порядок установления местных систем координат. В пункте 3 этого приказа говорится о том, что все местные системы координат должны устанавливаться в 3- или 6-градусной зоне картографической проекции общего земного эллипсоида, применяемого в Государственной геодезической системе координат 2011 г. (ГСК-2011). Таким образом, с 01.01.2021 в РФ должна действовать ГСК-2011.

Геодезическая система координат ГСК-2011 представляет собой геоцентрическую координатную систему отсчёта, в которой в качестве отсчётной поверхности был принят общеземной эллипсоид со следующими параметрами:

- большая полуось — 6378136,5 м;
- сжатие эллипсоида — 1/298,2564151.

По принципам ориентировки в теле Земли координатная система отсчёта ГСК-2011 идентична Международной земной системе отсчёта ITRS, а именно:

- начало системы располагается в центре масс Земли;
- ориентация осей задается по данным Международного бюро времени на эпоху 2011.0.

Практической реализацией координатной системы отсчёта ГСК-2011 являются пункты ФАГС, ВГС и СГС-1. Общая информация об этих пунктах дана в главе 4 данного учебника.

Координатная система отсчёта WGS-84. Система отсчёта WGS-84 разработана Министерством обороны США для поддержки глобальной деятельности, включающей составление карт и планов, позиционирование и навигацию. Начало системы находится в центре масс Земли, ось Z направлена в Условный земной полюс (УЗП), установленный МБВ на эпоху 1984.0, ось X направлена в точку пересечения плоскости опорного меридиана Гринвича и плоскости экватора УЗП на эпоху 1984.0. Ось Y дополняет систему до правой.

Система WGS-84 используется как опорная для спутников GPS начиная с 23 января 1987 г., заменив собой систему WGS-71. Обе эти системы были получены по доплеровским наблюдениям системы TRANZIT. Точность плановой привязки начальной реализации системы WGS-84 составляет 1–2 м [5].

В 1993–1994 гг. появились новые требования к точностным характеристикам системы WGS-84 со стороны геодезических пользователей GPS. В июне 1994 г. была введена новая версия WGS-84 (G730), где буква «G» обозначает GPS, цифра 730 — неделю GPS, начиная с 0^h UTC 2 января 1994 г. Следующей реализацией системы стала WGS-84 (G873). Буква «G» также обозначает GPS, а 873 — неделю GPS, начиная с 0^h UTC 29 сентября 1996 г. Система координат WGS-84 (G873) согласована с Международной земной системой отсчёта ITRF1994 с субдециметровой точностью [5].

20 января 2002 г. в США введена новая версия координатной системы отсчёта WGS-84 (G1150). В её установлении были использованы станции слежения BBC (US Air Force — USAF), станции Национального агентства геопро пространственной разведки (National Geospatial-Intelligence Agency — NGA) США (бывшее название Национальное управление по отображению и картографированию) и станции слежения сети Международной ГНСС-службы. В привязке системы участвовало 17 пунктов контрольного сегмента системы GPS. Координаты 49 станций IGS использовались для контроля полученного координатного решения. Привязанные пункты в системе координат WGS-84 (G1150) согласованы с Международной земной системой отсчёта ITRF2000 на эпоху 2001.0 с точностью около 2 см [88].

8 февраля 2012 г. Национальное агентство геопро пространственной разведки США объявила о реализации системы координат WGS-84 (G1674). Полученная система координат WGS-84 (G1674) полностью согласована с Международной земной системой отсчёта ITRF2008 на эпоху 2005.0 [88].

Координатная система отсчёта WGS-84(G1674) по сравнению с ITRF2008 показывает среднеквадратическую разницу 1 см в целом.

Последняя версия координатной системы отсчёта WGS-84 (G1762) была введена 08.07.2014 документом по стандартизации Национального агентства геопространственной разведки [83]. В привязке системы участвовало 19 пунктов контрольного сегмента системы GPS (рис. 1.4).

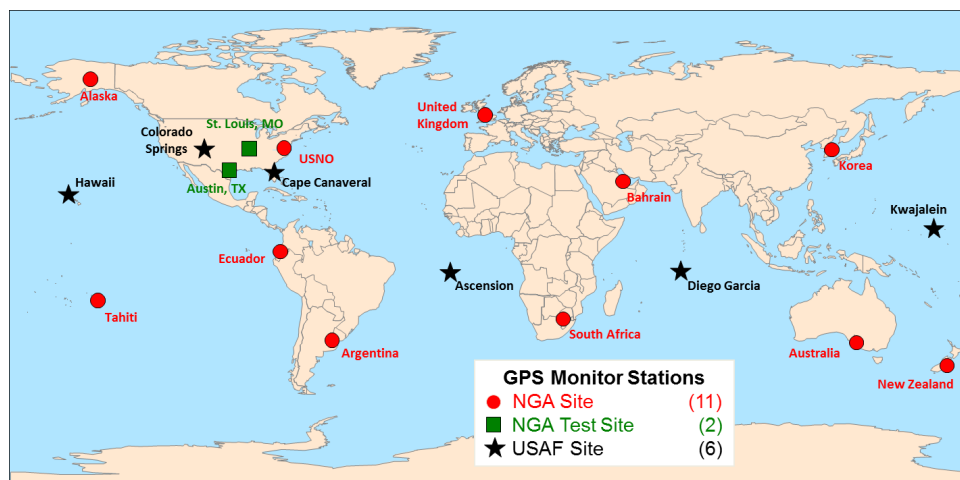


Рис. 1.4. Расположение станций контрольного сегмента системы GPS

Координатная система отсчёта WGS-84 (G1762) по сравнению с ITRF2008 показывает среднеквадратическую разницу 1 см в целом. Сравнение между точными эфемеридами NGA GPS, относящимися к WGS-84 (G1762), и точными эфемеридами IGS GPS, относящимися к ITRF2008, подтверждает согласованность этих координатных систем отсчета [50].

В таблице 1.1 приведена обобщенная информация о шести реализованных версиях координатной системы отсчёта WGS-84 [83].

Таблица 1.1

Версии координатной системы отсчёта WGS-84	Даты внедрений версий		Эпоха	Точность версии
	в бортовые эфемериды GPS	в точные эфемериды NGS		
WGS-84	1987	01.01.1987		1–2 м
WGS-84 (G730)	29.06.1994	01.01.1994	1994.0	10 см (СКО)
WGS-84 (G873)	29.01.1997	29.09.1996	1997.0	5 см (СКО)
WGS-84 (G1150)	20.01.2002	20.01.2002	2001.0	1 см (СКО)
WGS-84 (G1674)	08.01.2012	07.05.2012	2005.0	< 1 см (СКО)
WGS-84 (G1762)	16.10.2013	16.10.2013	2005.0	< 1 см (СКО)

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru