

Глобальные (общеземные) системы координат

Примером общеземной системы координат, реализованной в ходе международного сотрудничества многих стран является система координат (отсчета) ITRS и её практическая реализация ITRF.

Резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» и программным документом рабочей группы подкомитета по геодезии [28, 79] была отмечена важность международного сотрудничества, без которого ни одна страна не может в одиночку справиться с задачей создания глобальной геодезической системы координат (единой геодезической сети глобального масштаба).

Это утверждение не совсем справедливо, так как, по крайней мере, две страны в мире (а возможно три) сумели создать и длительное время поддерживать глобальные (общеземные) системы координат:

- WGS-84 (США);
- ПЗ-90 (СССР, Российская Федерация).

Точность реализации любой геодезической системы координат определяется точностью координат пунктов геодезической сети, использованных при выводе параметров этой системы. Эффективность применения любой геодезической системы координат зависит от количества пунктов геодезической сети, практически реализующих эту систему и их доступности для использования потребителем, а также от стабильности координат ее пунктов во времени.

Таким образом, в системе геодезического, картографического и навигационного обеспечения геодезические сети выполняют две равно важные функции. С одной стороны они являются поставщиком информации для вывода параметров геодезической системы координат, а с другой стороны – доступной потребителям практической реализацией этой системы.

Примерами глобальных спутниковых сетей являются [2, 5, 21, 22, 23]:

- сеть станций слежения глобальной системы позиционирования Global Positioning System - GPS (США), реализующих общеземную систему координат WGS-84 (World Geodetic System 1984);
- сеть станций глобальной навигационной спутниковой системы – ГЛОНАСС (Российская Федерация), реализующих общеземную систему координат ПЗ-90;
- международная земная сеть пунктов International Terrestrial Reference Frame – ITRF, реализующая международную земную опорную систему координат International Terrestrial Reference System – ITRS.

Иногда к глобальным геодезическим сетям относят пункты, Международной службы глобальных навигационных спутниковых систем IGS (International GNSS Service, IGS) [102], в прошлом International GPS Service. IGS была создана Международной ассоциацией геодезии МАГ (International Association of Geodesy, IAG) [100] в 1993 году и официально начала функционировать в январе 1994 года. IGS - это федерация, объединяющая более 200 национальных агентств, университетов и исследовательских институтов более чем в девяноста странах мира. IGS предоставляет орбиты ГНСС, данные отслеживания и другие информационные продукты в поддержку геодезических и геофизических исследований. IGS также поддерживает различные правительственные и коммерческие мероприятия и разрабатывает международные стандарты и спецификации данных ГНСС. В настоящее время сеть IGS включает более 500 пунктов.

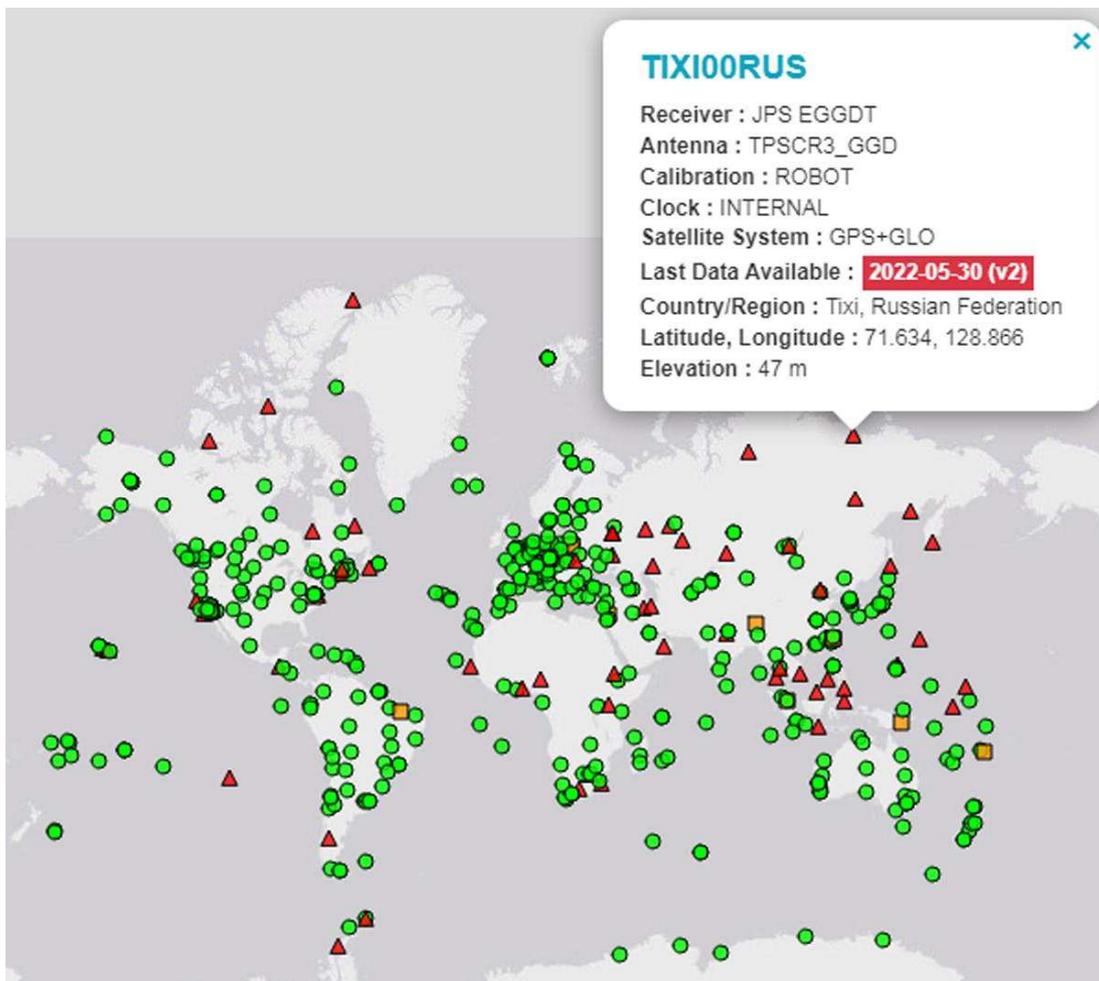


Рис. 8. Схема расположения пунктов IGS.

Доступ к данным: ● в настоящее время, ■ в текущем году, ▲ в прошлом году [102].

Создание, использование и совершенствование технологий спутниковой (космической) геодезии привело в конце 1950-х годов к созданию первых реализаций общеземных систем координат:

- World Geodetic System 1960 (WGS 60), разработанной в Соединенных Штатах Америки;
- Параметры Земли 1960 (ПЗ-60), разработанной в СССР.

В СССР в связи с началом космических полетов потребовалась единая общеземная система координат (отсчета), включая глобальную модель гравитационного поля Земли. Первые глобальные Параметры Земли (ПЗ-60) были выведены в ЦНИИГАиК под руководством и при непосредственном участии профессора Л. П. Пеллинен, в дальнейшем возглавившего работы по выводу уточненных глобальных параметров Земли последующих модификаций. Этот вывод с высокой точностью совпал с международными глобальными параметрами Земли, официально принятыми Международной ассоциацией геодезии в 1980 г. [15].

Важнейшим элементом глобальных параметров Земли, является модель ее гравитационного поля, благодаря которой обеспечивается геоцентричность глобальных систем координат, начало отсчета которых помещается в центр масс Земли.

Общеземная система координат WGS 84

Официальная информация правительства США о GPS и связанных с ней темах размещена на сайте GPS [95]. Глобальная система определения местоположения GPS эксплуатируется и поддерживается Космическими силами США (United States Space Force.). Официальный сайт GPS ведется Национальным координационным Бюро по вопросам космического определения местоположения, навигации и времени (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing). Прототипом системы координат, обеспечивающей GPS, была WGS 72, заменившая WGS 60, и реализованная доплеровской глобальной навигационной системой.

Контрольный сегмент GPS (Operational Control Segment - OCS) состоит из глобальной сети наземных станций, которые отслеживают спутники GPS, контролируют их передачу, выполняют анализ и отправляют команды и данные на спутники.

Контрольный сегмент (OCS) включает в себя главную станцию управления, альтернативную главную станцию управления, 11 командных и управляющих антенн, 16 объектов мониторинга. 6 пунктов мониторинга принадлежат Военно-воздушным силам США (United States Air Force), 10 пунктов – Национальному агентству геопространственной разведки (National Geospatial-Intelligence Agency - NGA). Расположение этих объектов показано на рис. 9.

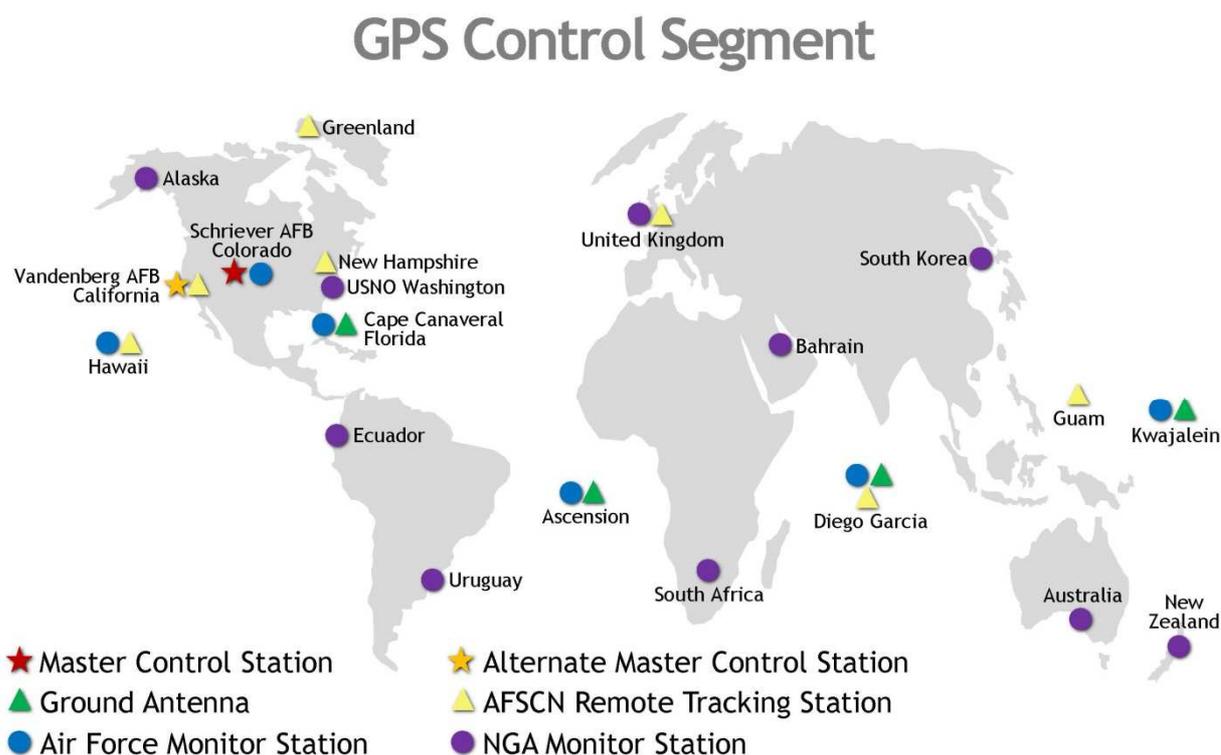


Рис. 9. Схема расположения объектов Контрольного сегмента GPS [95].

Реализация системы WGS 84 (G1762) введена 8 июля 2014 г. документом по стандартизации Национального агентства геопространственной разведки (NGA) Министерства обороны США «Общеземная геодезическая система 1984 года.

Определение и связь с локальными геодезическими системами NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84» [105].



Рис. 10. Документ по стандартизации Национального агентства геопространственной разведки Министерства обороны США. Общеземная система координат (геодезическая система) 1984 года. Определение и связь с локальными системами координат (геодезическими системами). 2014-07-08. Версия 1.0.0. NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84

WGS 84 (G1762) является шестым обновлением реализации системы координат (отсчета) WGS84. Предыдущие реализации WGS 84 (G1674), WGS 84 (G1150), WGS 84 (G873), WGS 84 (G730) и WGS 84. Индекс «G» означает, что для получения координат использовались измерения GPS. Число, следующее за «G», указывает номер недели GPS, в течение которой координаты были утверждены для реализации NGA. Первоначальная реализация WGS 84, полученная с использованием навигационной спутниковой системы TRANSIT, не имеет такого обозначения. В таблице 9 представлены название, дата введения, эпоха и общая абсолютная точность каждой реализации WGS 84.

Таблица 9

Реализация WGS 84	Дата внедрения		Эпоха	Точность
	Трансляция орбит GPS	Точные эфемериды NGA		
WGS 84	1987	1 Jan 1987		1-2 метра
WGS 84 (G730)	29 Jun 1994	2 Jan 1994	1994.0	10 см/компоненты СКП
WGS 84 (G873)	29 Jan 1997	29 Sep 1996	1997.0	5 см/ компоненты СКП
WGS 84 (G1150)	20 Jan 2002	20 Jan 2002	2001.0	1см/ компоненты СКП

WGS 84 (G1674)	8 Feb 2012	7 May 2012	2005.0	<1cm/ компоненты СКП
WGS 84 (G1762)	16 Oct 2013	16 Oct 2013	2005.0	<1cm/ компоненты СКП

NGA принимает многочисленные рекомендации Конвенции Международной службы вращения Земли и систем координат (отсчета) - МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS), изложенные в Конвенции МСВЗ 2010 г. [99]. Стандарт NGA дополняет Конвенцию МСВЗ в качестве руководства Министерства обороны США (Department of Defense - DoD) по внедрению, особенно там, где WGS 84 отличается от Конвенции МСВЗ. Созданная в 2013 году реализация WGS 84 (G1762), привязана к Конвенции МСВЗ 2010 г. и международной земной системе координат (отсчета) ITRF 2008.

В стандарте NGA.STND.0036 приведены данные о 17 постоянных станциях мониторинга GPS Министерства обороны США (DoD), принадлежащих как военно-воздушным силам США (United States Air Force - USAF), так и NGA. В стандарте приведены данные об эллипсоидальных координатах антенн рабочих пунктов станций мониторинга, расхождения геоцентрических прямоугольных координат последней (G1762) и предыдущей (G1674) реализаций WGS-84 для каждого пункта. Схема расположения станций мониторинга приведена на рис. 11, данные о двух тестовых станциях NGA не приведены.

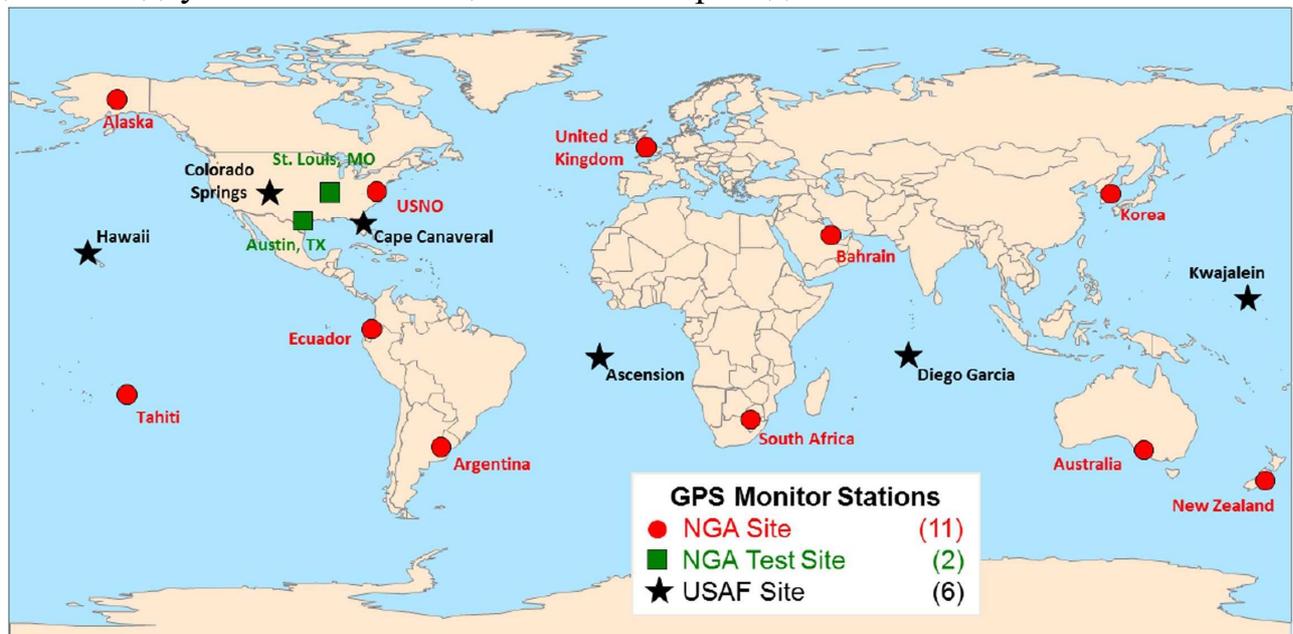


Рис. 11. Схема расположения станций мониторинга WGS 84 (G1762) [105].

Система WGS 84 (G1762) по сравнению с ITRF 2008 показывает среднеквадратическую разницу один сантиметр. Сравнение между точными эфемеридами GPS NGA, относящимися к WGS 84 (G1762), и точными эфемеридами GPS Международной службы ГНСС (International GNSS Service - IGS), относящимися к ITRF 2008, подтверждает согласованность этих двух систем. Это указывает на то, что две упомянутые реализации по существу идентичны, причем различия статистически незначимы для большинства приложений.

Следующая реализация WGS 84 (G2139) была выпущена 3 января 2021 года в качестве обновления G1762. Эта система координат соответствует ITRF 2014 года. В ближайшее время планируется приведение WGS 84 в соответствие с

ITRF 2020, включая постсейсмическую деформацию (PSD), и введение реализации WGS 84 (G2238).

Общеземная система координат ПЗ-90

В настоящее время развитием проекта ГЛОНАСС занимается Государственная корпорация «Роскосмос», а также министерства и ведомства России: Минобороны, МВД, Ростехнадзор, Минтранс, Росреестр, Минпромторг, Росстандарт, Росавиация, Росморречфлот, ФАНО.

Головной организацией по развитию и использованию системы ГЛОНАСС является АО «Российские космические системы». Головная организация по космическому комплексу ГЛОНАСС - АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва». Федеральным сетевым оператором в сфере навигационной деятельности является НП «ГЛОНАСС». Оперативный круглосуточный мониторинг и подтверждение характеристик ГЛОНАСС осуществляет Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ФГУП «ЦНИИмаш».

Геодезическая основа ГЛОНАСС определена Интерфейсными контрольными документами ИКД 1.0, ИКД 5.1, размещенными на официальном сайте АО «Российские космические системы» <http://russianspacesystems.ru/>.

В соответствии с Интерфейсными контрольными документами для геодезического обеспечения ГЛОНАСС и решения навигационных задач используется геодезическая система «Параметры Земли 1990 г.» последней редакции.

Последняя версия системы координат ПЗ-90 (ПЗ-90.11) ее основные параметры, физические и геометрические характеристики определены постановлением Правительства Российской Федерации «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы» [26] и приказом Минобороны России «Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров в отношении общеземной геоцентрической системы координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11)». Детальное описание общеземной системы координат ПЗ-90 приведено в специализированном справочнике «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11)», размещенном на официальном сайте Министерства обороны Российской Федерации <http://mil.ru/> [20].

ВОЕННО-ТОПОГРАФИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ГЕНЕРАЛЬНОГО ШТАБА ВООРУЖЕННЫХ СИЛ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**«ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛИ 1990 ГОДА»
(ПЗ-90.11)**

Специализированный справочник

Москва – 2020 г.

Рис. 12. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11).
Специализированный справочник. ВТУ ГШ ВС РФ. 2-е издание

При уточнении геоцентрической системы координат максимально использованы данные об установлении общеземных систем координат, полученные отечественными и международными научными организациями из многолетних наблюдений искусственных спутников Земли и космических объектов. В ПЗ-90.11 ориентировка координатных осей, линейный масштаб и положение начала системы координат обеспечили сходимость с аналогичными параметрами Международной земной опорной сети ITRF на сантиметровом уровне.

Для повышения точности взаимного положения пунктов космической геодезической сети (КГС) и точности согласования ее с ITRF использован представительный ряд наблюдений спутников GPS и ГЛОНАСС, накопленный после вывода ПЗ-90.02. Новым в технологии уточнения геоцентрического положения сети пунктов, закрепляющих систему координат ПЗ-90.11, было включение в обработку рядов измерительной и сопутствующей информации системы DORIS 2002, 2008 и 2010 гг., полученных на совмещенных пунктах этой системы с пунктами сети IGS.

Геоцентрическая система ПЗ-90.11 является практической реализацией общеземной системы координат на эпоху 2010.0. Она закреплена глобально

распределенными пунктами КГС, координаты и скорости движения которых определены из обработки спутниковых измерений. 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". Средняя квадратическая погрешность (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.

Система координат ПЗ-90.11 распространена на ряд пунктов сети IGS. Положение пунктов КГС и IGS, расположенных на территории России, в системе координат ПЗ-90.11 на эпоху 2010.0 приведено на рис. 13.



Рис. 13. Схема расположения пунктов КГС (▲), IGS (●) и DORIS (■) на территории России [20].

Аналогами геоцентрической системы координат ПЗ-90 служат общеземная система координат WGS-84 (США) и международная земная опорная система ITRS. При установлении систем ПЗ-90, WGS-84 и ITRS использовались одни и те же теоретические положения. Однако при практической реализации этих положений между ними обнаруживаются небольшие расхождения, которые могут быть объяснены различием в составе и объеме использованной измерительной информации и методическими различиями [20, 21].

Международная земная система координат (отсчета) ITRS

Наиболее точной и эффективной глобальной спутниковой геодезической сетью является практическая реализация международной земной опорной системы (International Terrestrial Reference System, ITRS), именуемая International Terrestrial Reference Frame, ITRF. Схема расположения станций ITRF 2020 приведена на рисунке 14. [104].



Рис. 14. Схема расположения станций ITRF 2020 [104]

Все современные реализации общеземных геоцентрических систем координат WGS-84 (G1762), ITRF 2014, ПЗ-90.11 и ряд других основаны на одной и той же международной земной опорной системе ITRS (International Terrestrial Reference System). Принципы ориентации такой системы координат в теле Земли определены Международной службой вращения Земли - МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) и Международной ассоциацией геодезии - МАГ (International Association of Geodesy, IAG), являющейся одной из восьми ассоциаций Международного геодезического и геофизического союза - МГГС (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG).

Международная небесная опорная система ICRS (International Celestial Reference System) и международная земная опорная система ITRS (International Terrestrial Reference System) определены МСВЗ [98, 99, 116].

Практические реализации международной небесной опорной системы координат ICRS и международной земной опорной системы координат ITRS носят названия International Celestial Reference Frame (ICRF) и International Terrestrial Reference Frame (ITRF) являются опорными (исходными) эталонами шкал направлений в пространстве, местоположения (позиции) на Земле, векторов скорости и ускорения относительно Земли в виде совокупности пространственных реперов – станций, представленных в ICRF с приписанными угловыми координатами направлений на квазары и другие удаленные источники радиоизлучения, а в ITRF с приписанными декартовыми координатами X , Y , Z [10].

Используемая в настоящее время процедура вывода ITRF предусматривает комбинирование нескольких частных решений TRF, получаемых в различных центрах обработки с использованием наблюдений различными методами космической геодезии: радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой – РСДБ (Very Long Baseline Interferometry - VLBI), лазерной локации спутников – ЛЛС (Satellite Laser Ranging - SLR), доплеровской спутниковой системой DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), глобальными навигационными спутниковыми системами - ГНСС (Global Navigation Satellite System - GNSS), таким как GPS (США), ГЛОНАСС (Россия) и в последнее время Бэйдоу – Beidou (КНР) [2, 5, 21].

Современные требования к точности систем координат обуславливают необходимость учитывать изменения координат во времени, связанные с влиянием глобальных геодинамических процессов.

Поэтому каталоги координат пунктов ITRF вследствие непрерывного совершенствования сети и геодинамических процессов периодически обновляют и указывают их эпоху. В настоящее время на официальном сайте [104] доступны для загрузки результаты реализаций ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014, ITRF2020. На сайте перечислены также реализации ITRF89, ITRF90, ITRF91, но по этим реализациям доступны только описания (IERS Technical Note No. 6, IERS Technical Note No. 9, IERS Technical Note No. 12).

Геоцентрическая система координат и параметры общеземного эллипсоида определяются и уточняются при содействии Международной службы ГНСС (IGS) [102], в прошлом International GPS Service for Geodynamics - добровольного объединения более чем 200 национальных агентств и служб, занимающихся сбором измерительных данных GPS и ГЛОНАСС с постоянно работающих базовых станций, расположенных по всему миру. Целью IGS является поддержка научных исследований в области изучения планеты Земля, многопрофильных приложений и образования. В настоящее время IGS входит в Международную ассоциацию геодезии МАГ (International Association of Geodesy, IAG) [100].

Следует отметить, что на территории России расположено только 22 пункта IGS, данные наблюдений и координаты которых включены в каталоги ITRF.

Одной из проблем введения глобальных (общеземных) систем координат для целей картографии и навигации является использование эллипсоида, к поверхности которого должны быть отнесены как геодезические эллипсоидальные координаты, так и топографические и навигационные карты [21].

По состоянию на сегодняшний день, разработанный в рамках создания в ГСК-2011 в ЦНИИГАиК под руководством Г. В. Демьянова, эллипсоид (далее – «эллипсоид ЦНИИГАиК»), наиболее точно соответствует лучшему значению размеров общеземного эллипсоида, определенному Международной службой вращения Земли и систем координат МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) на момент введения реализации международной земной системы координат ITRF 2008 [99]. При выводе ITRF 2014 новые параметры эллипсоида не определялись [116]. Использувавшиеся до последнего времени эллипсоиды Красовского (введен Постановлением Совета Министров

СССР от 7 апреля 1946 г. № 760), GRS80 (принят XVII генеральной ассамблеей Международного геодезического и геофизического союза - МГГС (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) в Канберре в декабре 1979 г.) не отвечают по точности современным оценкам параметров общеземного эллипсоида. Параметры эллипсоидов основных систем координат приведены в таблице 10.

Таблица 10

Параметр эллипсоида	Система координат, эллипсоид					
	ГСК-2011, ЦНИИГАиК	ПЗ-90.11	ITRF2008 ITRF2014	GRS80	WGS 84 (G1762)	CGCS2000
Большая полуось a , м	6 378 136,500	6 378 136	6 378 136,6 $\pm 0,1$	6 378 137	6 378 137,0	6 378 247,0
Сжатие $1/\alpha$ ($1/f$)	298,2564151	298,25784	298,25642 $\pm 0,00001$	298,257222101	298,257223563	298,257222101
Геоцентрическая гравитационная постоянная Земли fM (GM), км ³ /с ²	398 600,4415	398 600,4418	398 600,4418 $\pm 0,0008$	398 600,5	398 600,4418	398 600,4418