

ГЛОБАЛЬНАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО УЧАСТИЮ РФ В ЕЕ СОЗДАНИИ

Г.Г. Побединский (Российское общество геодезии, картографии и землеустройства)

В 1980 г. окончил геодезический факультет Новосибирского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (в настоящее время — Сибирский государственный университет геосистем и технологий) по специальности «прикладная геодезия». После окончания института работал в НИИ прикладной геодезии (Сибгеоинформ, Новосибирск). В 1986 г. окончил аспирантуру ЦНИИГАиК, затем работал в Московском АГП. С 1992 г. — генеральный директор Верхневолжского АГП (Нижний Новгород), с 2006 г. — заместитель руководителя Федерального агентства геодезии и картографии, с 2010 г. — заместитель директора ЦНИИГАиК, с 2012 г. — заместитель генерального директора ОАО «Роскартография», с 2014 г. — директор ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД». С 2018 г. — заведующий лабораторией ГИС-технологий и биоинформатики Нижегородского НИИ эпидемиологии и микробиологии (ННИИЭМ) им. академика И.Н. Блохиной. Кандидат технических наук. Заслуженный работник геодезии и картографии РФ. Член Центрального правления Российского общества геодезии, картографии и землеустройства.

В.И. Кафтан (Геофизический центр РАН)

В 1971 г. окончил Московский топографический политехникум (в настоящее время — Московский колледж геодезии и картографии), в 1977 г. — геодезический факультет МИИГАиК по специальности «прикладная геодезия». В настоящее время — главный научный сотрудник лаборатории геодинамики ФГБУН «Геофизический центр РАН». Доктор технических наук.

В.П. Савиных (МИИГАиК)

В 1969 г. окончил оптико-механический факультет МИИГАиК по специальности «инженер-оптик-механик». После окончания института работал в ЦКБЭМ/НПО «Энергия». В 1988 г. избран ректором МИИГАиК, с 2007 г. по настоящее время — президент МИИГАиК. Летчик-космонавт СССР. Совершил три космических полета (1981 г., 1985 г. и 1988 г.). Дважды Герой Советского Союза. Академик РАН по отделению «Науки о Земле», профессор, доктор технических наук.

В российской геодезической литературе в настоящее время отсутствует единое и четкое толкование понятия «Геодезическая система координат». В официальных источниках и научно-технических изданиях можно найти различные и даже противоречивые определения этого термина. За рубежом соответствующая терминология также неоднозначна и не упорядочена.

Справочник стандартных (нормативных) терминов «Геодезия, картография, топогра-

фия, фотограмметрия, геоинформационные системы, пространственные данные» [1] приводит несколько определений, близких к термину «Геодезическая система координат».

Геодезические координаты — три величины, характеризующие ориентировку референц-эллипсоида в теле Земли и определяющие взаимную ориентировку основных плоскостей и осей астрономической и геодезической систем координат (ГОСТ 22268-76. Гео-

дезия. Термины и определения).

Геоцентрические координаты — величины, определяющие положение точки в системе координат, у которой начало совпадает с центром масс Земли (ГОСТ 22268-76. Геодезия. Термины и определения).

Геодезическая система координат — система координат, в которой положение объекта описывается геодезическими широтой и долготой, а в трехмерном пространстве —

геодезической высотой (ГОСТ Р 52572-2006 «Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования»).

Термин «Система геодезических координат» использовался в нормативных документах по установлению систем координат СК-42 [2], СК-95 [3], а термин «Геодезическая система координат» — в нормативных документах по установлению системы координат ГСК-2011 [4, 5], но определение этих терминов не давалось. В настоящее время существует некоторая терминологическая неопределенность такого основополагающего понятия как «Геодезическая система координат», возникшая после введения ГОСТ Р 52572-2006, который соответствует международному стандарту ISO 19111:2003 «Geographic information — Spatial referencing by coordinates».

ГОСТ Р 52572-2006 прямо вводит следующие понятия.

Геодезическая отсчетная основа (геодезическая основа) — совокупность геодезических пунктов (или иных объектов — носителей координат) и соответствующих значений координат.

Геодезическая система координат — система координат, в которой положение объекта описывается геодезическими широтой и долготой, а в трехмерном пространстве — геодезической высотой.

Геодезические даты — набор параметров, описывающих связь координатной системы с Землей.

Исходные даты — термин, обобщающий геодезические, высотные и местные даты. Примечание: даты определяют положение начала, масштаб и ориентировку осей системы координат по отношению к Земле.

Координата — число из упорядоченного набора N чи-

сел, описывающих положение пункта в N -мерном пространстве.

Координатная основа — совокупность данных, обеспечивающих описание местоположения с использованием координат.

Координатная система отсчета — система координат, связанная (для задач, регламентируемых настоящим стандартом) с Землей исходными датами.

Система координат — набор математических правил, описывающих, как координаты должны быть соотнесены с точками пространства.

ГОСТ Р 52572-2006, как и ISO 19111:2003, не регламентирует вопросов создания, использования и периодического уточнения глобальных (общеземных) и национальных систем координат, и предназначен исключительно для пространственного описания объектов в геоинформационных системах, но термины этого стандарта не совсем корректно применяют в геодезии.

В отечественной геодезии принято обобщающее понятие системы координат, как совокупности математических правил, исходных дат, закрепленных на местности пунктов геодезических сетей и каталогов координат.

Этот подход был сформулирован ученым с мировым именем Г.В. Демьяновым в период работ по созданию государственной геодезической системы координат 2011 года (ГСК-2011) в статье «Геодезические системы координат, современное состояние и основные направления развития» [6] и в более поздних публикациях [7–12]. Наиболее лаконичное определение термина «Геодезическая система координат» сформулировано в статье [8–10]:

«Геодезическая система координат — геодезическая

категория, определяемая совокупностью двух факторов: математических правил, декларативно описывающих характеристики системы (принципы ориентирования координатных осей, положение начала координат, параметры эллипсоида и др.), и практической реализации системы координат в виде опорных геодезических сетей, представляющих собой совокупность геодезических пунктов, закрепленных на поверхности Земли».

В англоязычной литературе для определения этих факторов существуют термины: International Terrestrial Reference System (ITRS) и International Terrestrial Reference Frame (ITRF).

В официальных документах ООН на русском языке (одном из официальных языков ООН) термин «Глобальная геодезическая система координат» используется именно в такой интерпретации [13, 14]. В официальных документах ООН на английском языке применяется термин «Global Geodetic Reference Frame».

ГОСТ Р 8.699-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Величины, единицы, шкалы измерений, используемые в глобальной навигационной спутниковой системе» дает следующие определения международным небесной и земной опорным системам координат.

Международная небесная опорная система координат ICRS (International Celestial Reference System) и международная земная опорная система координат ITRS определены Международной службой вращения Земли и систем координат IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) [15–17].

Практические реализации ICRS и ITRS носят названия ICRF (International Celestial Refe-

gence Frame) и ITRF и 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 (ГОСТ Р 8.699-2010).

В резолюции Генеральной Ассамблеи ООН «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» [13] было отмечено «экономическое и научное значение и растущая необходимость наличия четкой и устойчивой глобальной геодезической системы координат (ГГСК) для всей планеты, которая позволила бы обеспечивать взаимную увязку геодезических измерений, проводимых в любом районе Земли и в космосе, включая определения пространственного положения и гравиметрические измерения, в качестве основы и отправной точки при установлении местоположения и высоты для геопространственной информации, используемой во многих науках о Земле и в самых разных сферах жизни общества, в том числе в целях мониторинга уровня моря и изменения климата, борьбы с опасными природными явлениями и бедствиями, а также в целом ряде отраслей (включая горнодобывающую промышленность, сельское хозяйство, транспорт, судоходство и строительство), в которых точное определение координат обеспечивает повышение эффективности».

В соответствии с резолюцией государствам-членам ООН было предложено самостоятельно внедрять практику

открытого обмена геодезическими данными и информацией о геодезических стандартах и методах в целях содействия созданию ГГСК и региональных геодезических сетей, целенаправленно развивать и поддерживать соответствующую национальную геодезическую инфраструктуру в качестве важного средства совершенствования ГГСК, осуществлять многостороннее сотрудничество для устранения инфраструктурных пробелов и дублирования усилий в контексте разработки более надежной ГГСК.

Механизмы управления для поддержания ГГСК кратко сформулированы в программном документе рабочей группы подкомитета по геодезии Комитета экспертов ООН по управлению глобальной геопространственной информацией [14]. Были рассмотрены четыре механизма управления: межправительственная организация (МПО), Конвенция ООН, координационная группа и целевой фонд. Признав, что наиболее действенными являются МПО и Конвенция ООН, тем не менее, выбрали координационную группу и целевой фонд. Ознакомившись с инициативой КНР создать в стране Глобальный центр передового опыта в области геопространственных знаний и с механизмами финансирования этого центра, был определен единственный возможный вариант — создать глобальный геодезический центр передового опыта (ГЦПО) под эгидой Комитета. ГЦПО будет действовать в качестве оперативного центра ГГСК, поддерживающего цели Комитета экспертов ООН по управлению глобальной геопространственной информацией и его подкомитета по геодезии, с тремя первоначальными тематическими приоритетами: расширение глобального со-

трудничества, координация ГГСК и оказание технической помощи, наращивание потенциала.

При этом в программном документе было отмечено, что подкомитет по геодезии имеет ограниченную работоспособность, необходимо выделять специальные человеческие ресурсы для выполнения таких ключевых задач, как координация, информационно-пропагандистская деятельность и коммуникация. На втором пленарном заседании подкомитета в Дэцине (Китай) в ноябре 2018 г. было создано Бюро подкомитета по геодезии. Это повысило его работоспособность, но не до такой степени, чтобы подкомитет обладал достаточным рабочим потенциалом для пропаганды и координации осуществления «дорожной карты» ГГСК в государствах-членах ООН. Рабочий потенциал бюро ограничен, поскольку все его члены занимают руководящие должности на национальном уровне и уделяют приоритетное внимание задачам, решаемых в рамках своих должностных обязанностей.

В резолюции Генеральной Ассамблеи ООН «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» и программном документе рабочей группы подкомитета по геодезии Комитета экспертов ООН по управлению глобальной геопространственной информацией [13, 14] была отмечена важность международного сотрудничества, без которого ни одна страна в мире не может в одиночку справиться с задачей создания глобальной геодезической системы координат. Это утверждение не совсем справедливо, так как, по крайней мере, две страны сумели создать и длительное время поддерживать глобальные (общеземные) системы координат:

— WGS–84 (World Geodetic System 1984, США);

— ПЗ–90 (геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года», Российская Федерация).

▼ **Опыт создания и обеспечения глобальных (общеземных) систем координат**

Точность любой геодезической системы координат определяется точностью координат пунктов геодезической сети, использованных при выводе параметров этой системы. А эффективность ее применения зависит от количества пунктов геодезической сети, практически реализующих эту систему и их доступности для потребителей.

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

Использование спутниковых технологий в геодезии привело к появлению геодезических сетей нового типа — спутниковых геодезических сетей.

Спутниковые геодезические сети принято разделять на глобальные, континентальные, национальные, региональные и локальные.

Примерами глобальных спутниковых сетей являются:

— сеть станций слежения глобальной системы позиционирования Global Positioning System — GPS (США), реализующая общеземную систему координат WGS–84;

— сеть станций глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС (Российская Федерация), реализующая общеземную систему координат ПЗ–90;

— международная сеть пунктов ITRF, реализующая международную земную опорную систему координат ITRS [12, 18–20].

При установлении глобальных геоцентрических систем координат WGS–84, ПЗ–90 и ITRS используются одни и те же теоретические положения. Однако в практической реализации этих положений между указанными системами координат имеются небольшие расхождения, которые могут быть объяснены различием в составе и объеме использованной измерительной информации и методическими отличиями.

Общеземная система координат WGS–84

Глобальная система позиционирования GPS эксплуатируется и поддерживается Военно-воздушными силами (ВВС) США (United States Air Force). Официальная информация Правительства США о системе GPS и связанных с ней темах размещена на сайте [21], который ведется Национальным координационным Бюро по вопросам пространственного позиционирования, навигации и времени (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing).

Сегмент оперативного управления GPS (Operational Control Segment) состоит из глобальной сети наземных объектов, которые отслеживают сигналы спутников, контролируют передачу данных и выполняют их анализ, а также отправляют команды и корректирующую информацию в созвездие спутников.

Текущий сегмент оперативного управления GPS включает мастер-станцию управления, альтернативную мастер-станцию управления, 11 командно-контрольных антенн и 16 пунктов мониторинга (из них 6 пунктов принадлежат ВВС США, а 10 — Национальному агентству геопространственной разведки NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) Министерства обороны США (Department of Defense). Расположение этих объектов показано на рис. 1.

Последняя версия системы координат WGS–84 (G1762) была введена 8 июля 2014 г. документом по стандартизации Национального агентства геопространственной разведки [22].

Этот стандарт NGA определяет систему координат Министерства обороны США WGS–84. Стандарт касается сле-

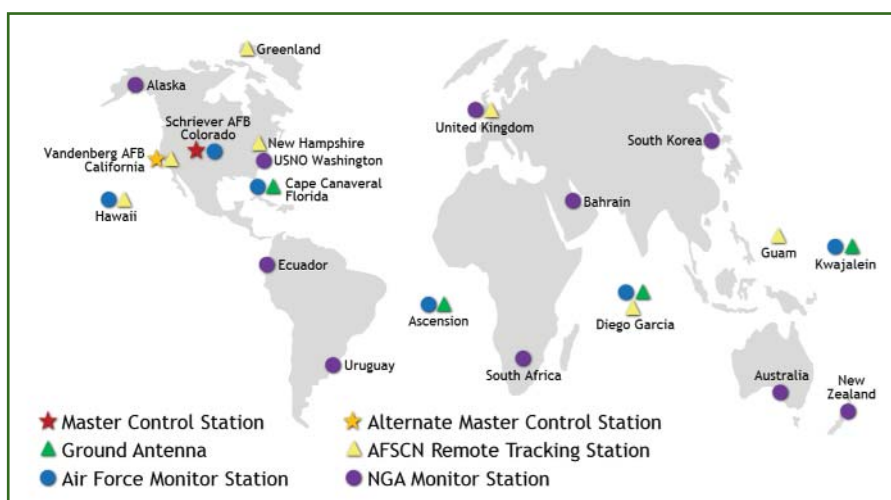


Рис. 1

Схема расположения объектов сегмента оперативного управления GPS [21]

дующих предметных областей WGS–84:

- система координат;
- использование глобальной системы позиционирования (GPS) при разработке системы координат (отсчета) WGS–84;
- эллипсоид и определение его параметров;
- эллипсоидальная гравитационная формула;
- гравитационная модель Земли 2008 (EGM2008);
- модель геоида EGM2008;
- мировая магнитная модель (WMM);
- связь WGS–84 с другими геодезическими системами координат;
- точность WGS–84 и ее моделей;
- реализация указаний (рекомендаций).

В 2019 г. планировалось издать стандарт, включающий обновленные параметры системы отсчета WGS–84 и мировую магнитную модель WMM.

Геоцентрическая система координат WGS–84 первоначально была получена только с использованием навигационной спутниковой системы Военно-морского флота США (TRANSIT) и представлена в виде однородной глобальной сети с точностью координат пунктов 1–2 м. Система координат неоднократно уточнялась. В стандарте NGA [22] приведены данные о 17 постоянно дей-

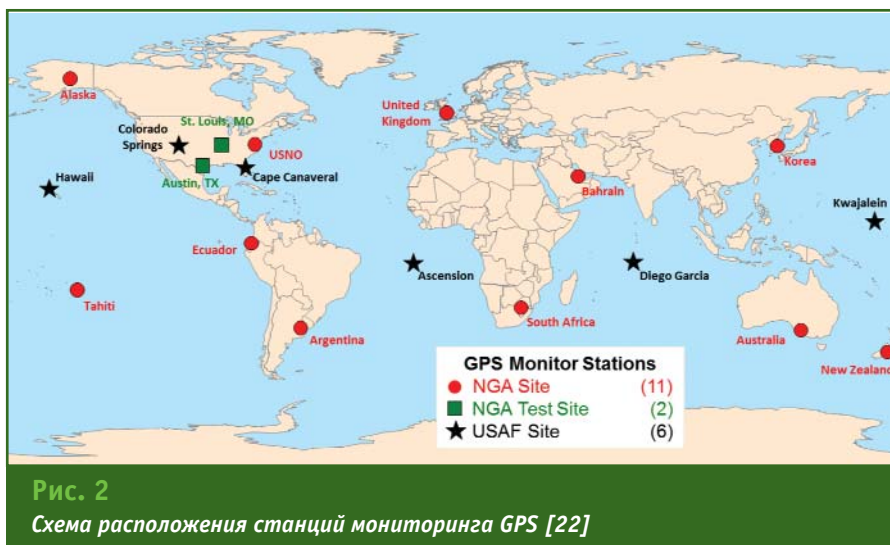


Рис. 2

Схема расположения станций мониторинга GPS [22]

ствующих станций мониторинга GPS Министерства обороны США, принадлежащих как BBC США, так и Национальному агентству геопространственной разведки. 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 GPS приведена на рис. 2, данные о двух тестовых станциях NGA отсутствуют.

WGS–84 (G1762) является шестым обновлением реализации системы отсчета WGS–84. Предыдущими реализациями, начиная с 1987 г., были WGS–84, WGS–84 (G730), WGS–84 (G873), WGS–84

(G1150) и WGS84 (G1674) — табл. 1. 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. Первая реализация WGS–84, полученная с использованием навигационной спутниковой системы TRANSIT, не имеет такого обозначения.

Национальное агентство геопространственной разведки получает многочисленные рекомендации Конвенции IERS, изложенные в [16]. Стандарт NGA дополняет Конвенцию IERS 2010 в качестве руководства Министерства обороны США по внедрению, особенно там, где WGS–84 отличается от Конвенции IERS 2010. В 2013 г. была создана новая реализация

Геоцентрическая система координат WGS–84

Таблица 1

Реализация	Дата внедрения		Эпоха	Точность
	Трансляция орбит GPS	Точные эфемериды NGA		
WGS–84	1987 г.	01.01.1987		1–2 м
WGS–84 (G730)	29.06.1994	02.01.1994	1994.0	10 см / компоненты СКП
WGS–84 (G873)	29.01.1997	29.09.1996	1997.0	5 см / компоненты СКП
WGS–84 (G1150)	20.01.2002	20.01.2002	2001.0	1 см / компоненты СКП
WGS–84 (G1674)	08.02.2012	07.05.2012	2005.0	<1 см / компоненты СКП
WGS–84 (G1762)	16.10.2013	16.10.2013	2005.0	<1 см / компоненты СКП

системы координат (отсчета) WGS-84, привязанная к Конвенции IERS 2010 и международной земной системе координат ITRF2008.

Система координат WGS-84 (G1762) по сравнению с ITRF2008 показывает среднеквадратическую разницу один сантиметр в целом. Сравнение между точными эфемеридами NGA GPS, относящимися к WGS-84 (G1762), и точными эфемеридами IGS GPS, относящимися к ITRF2008, подтверждает согласованность этих систем координат (отсчета). Это указывает на то, что две системы по существу идентичны, причем различия статистически незначимы для большинства приложений.

Общеземная система координат ПЗ-90

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

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. Решетнева». Оператором государственной автоматизированной информационной системы «ЭРА-ГЛОНАСС» является АО «ГЛОНАСС». Федеральный сетевой оператор в сфере навигационной деятельности — НП «ГЛОНАСС». Оперативный круглосуточный мониторинг и подтверждение характеристик навигационного поля ГЛОНАСС осуществляет Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ФГУП «ЦНИИмаш».

Геодетическая основа ГЛОНАСС определена Интерфейсными контрольными документами, размещенными на официальном сайте АО «Российские космические системы» [23, 24]. В соответствии с этими документами для геодетического обеспечения ГЛОНАСС и реше-

ния навигационных задач используется система координат ПЗ-90 последней редакции.

Первое описание системы координат ПЗ-90 было выпущено редакционно-издательским отделом Топографической службы Вооруженных сил РФ в 1991 г. [25].

С 1995 г. в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 07.03.1995 № 237 «О проведении работ по использованию глобальной навигационной спутниковой системы «ГЛОНАСС» в интересах гражданских потребителей» появилась возможность использования системы ГЛОНАСС в интересах гражданских потребителей, а система координат ПЗ-90 была установлена как геодетическая основа системы ГЛОНАСС. В 1998 г. Координационным научно-информационным центром был опубликован справочный документ [26], в котором приводилась схема пунктов космической геодетической сети (КГС), закрепляющих геоцентрическую систему координат ПЗ-90, включающей 26 пунктов на территории стран СНГ (1 — Мурманск, 2 — Пулков, 3 — Шепетовка, 4 — Черновцы, 5 — Симферополь, 6 — Москва, 7 — Сарапул, 8 — Актюбинск, 9 — Казах, 10 — Чарджоу, 11 — Алма-Ата, 12 — Балхаш, 13 — Омск, 14 — Воркута, 15 — Норильск, 16 — Енисейск, 17 — Иркутск, 18 — Мирный, 19 — Тикси, 20 — Якутск, 21 — Благовещенск, 22 — Уссурийск, 23 — Комсомольск-на-Амуре, 24 — Магадан, 25 — Елизово, 26 — Анадырь и 7 пунктов в Антарктиде (27 — Русская, 28 — Беллинсгаузен, 29 — Новолазаревская, 30 — Молодежная, 31 — Мирный, 32 — Восток, 33 — Ленинградская) — рис. 3.

Геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90) была установлена в качестве государст-

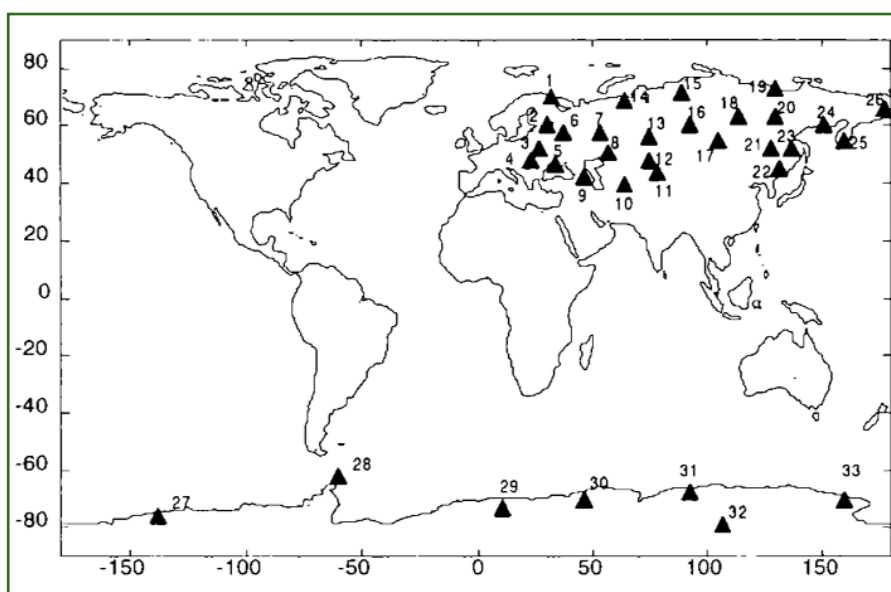


Рис. 3

Схема расположения пунктов КГС, закрепляющих геоцентрическую систему координат ПЗ-90 [26]

венной системы координат для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач Постановлением Правительства РФ [3].

Первая модернизация ПЗ–90 была выполнена в 2002 г. (ПЗ–90.02) с использованием большого объема измерительной информации космического геодезического комплекса ГЕО–ИК, полученной после 1990 г., не вошедшей в обработку при выводе ПЗ–90, и высокоточных измерений на пунктах КГС, полученных с использованием аппаратуры ГЛОНАСС/GPS. Уточненная версия системы координат ПЗ–90 (ПЗ–90.02) была введена Распоряжением Правительства РФ [27].

Последняя версия системы координат ПЗ–90 (ПЗ–90.11), ее основные параметры, физические и геометрические характеристики определены Постановлениями Правительства РФ [4, 5] и утверждены приказом Минобороны России [28].

Детальное описание общеземной системы координат ПЗ–90.11 приведено в справочном документе, размещенном на официальном сайте Минобороны России [29].

При уточнении геоцентрической системы координат максимально использовались 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 [29].

Для повышения точности взаимного положения пунктов

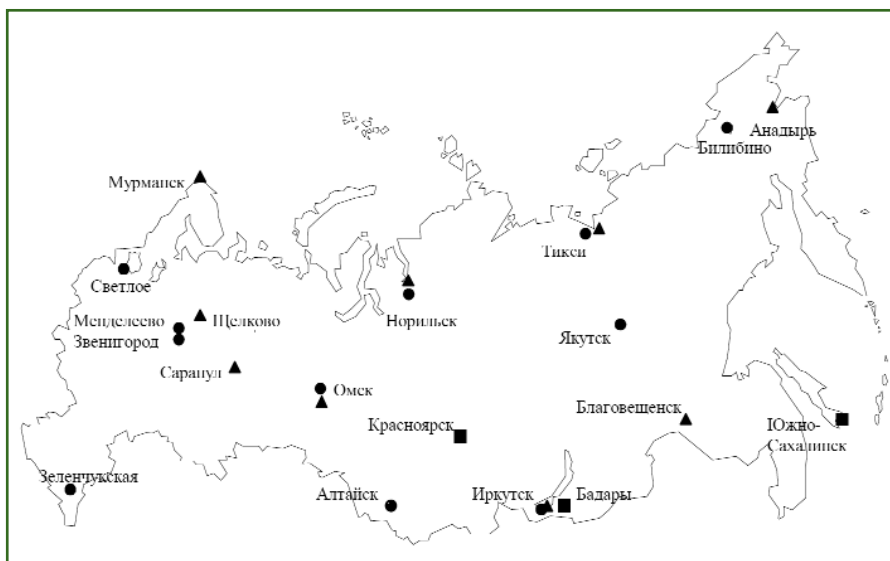


Рис. 4

Схема расположения пунктов КГС (▲), IGS (●) и DORIS (■) на территории РФ [29]

КГС и согласования с ITRF использовался 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 доплеровской спутниковой системы DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) 2002, 2008 и 2010 гг., полученной на совмещенных пунктах этой системы и сети IGS.

Геоцентрическая система координат 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 направ-

ления 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.

Система координат ПЗ–90.11 распространена на ряд пунктов сети IGS. Пункты КГС, IGS и DORIS, расположенные на территории РФ, в системе координат ПЗ–90.11 приведены на рис. 4.

Международная земная опорная система координат ITRS

Практической реализацией международной земной опорной системы координат ITRS является наиболее точная и эффективная глобальная спутниковая геодезическая сеть ITRF. Каталоги координат пунктов ITRF вследствие непрерывного совершенствования сети и геодинамических процессов периодически обновляют и указывают их эпоху. В настоя-

щее время на официальном сайте доступны для загрузки каталоги координат в реализациях ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014 [30]. В перечне приведены также реализации ITRF92 и ITRF93, но их результаты на сайте недоступны. Схема расположения станций ITRF2014 представлена на рис. 5 [17].

Все современные реализации общеземных геоцентрических систем координат WGS-84 (G1762), ITRF2014, ПЗ-90.11 и ряд других основаны на одной и той же международной земной опорной системе координат ITRS. Принципы ориентации такой системы координат в теле Земли определены Международной службой вращения Земли и систем координат и Международной ассоциацией геодезии IAG (International Association of Geodesy) [31], являющейся одной из семи ассоциаций Международного геодезического и геофизического союза IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Российская Федерация является действительным членом IUGG и IAG.

Практическая, наиболее точная на данный момент реализация международной земной опорной системы координат ITRS, носит название ITRF. Используемая процедура ее вывода предусматривает комбинирование нескольких частных решений, получаемых в центрах обработки с использованием наблюдений различными методами космической геодезии: радиointерферометрии со сверхдлинной базой VLBI (Very Long Baseline Interferometry), лазерной локации спутников SLR (Satellite Laser Ranging), доплеровской спутниковой системой DORIS, глобальными навигационными спутниковыми системами GNSS (Global Navigation Satellite System), такими как GPS, ГЛОНАСС и в последнее время Beidou (КНР) [12, 20].

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

Поэтому каталоги координат пунктов геоцентрической сис-

темы координат ITRF вследствие непрерывного совершенствования сети и геодинимических процессов периодически обновляют и указывают их эпоху. В настоящее время начата публикация реализации ITRF2020 [30].

Геоцентрическая система координат и параметры общеземного эллипсоида определяются и уточняются при содействии Международной службы глобальных навигационных спутниковых систем IGS (International GNSS Service) — добровольного объединения более чем 200 национальных агентств и служб, занимающихся сбором данных GPS и ГЛОНАСС с постоянно действующих базовых станций, расположенных по всему миру [32]. Целью IGS является поддержка научных исследований в области изучения планеты Земля, многопрофильных приложений и образования. В настоящее время IGS входит в IAG.

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

В 1987 г. решением Генеральной Ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза была создана подкомиссия SC1.3 Международной ассоциации геодезии по региональным опорным сетям. SC1.3 включает региональные подкомиссии, ответственные за соответствующие региональные блоки, а именно: SC1.3a по Европе, SC1.3b по Южной и Центральной Америке, SC1.3c по Северной Америке, SC1.3d по Африке, SC1.3e по Азиатско-Тихоокеанскому региону и SC1.3f по Антарктике [31].

Блока и соответствующей инфраструктуры ITRF по Восточной Европе, Северной и Средней Азии, покрывающих

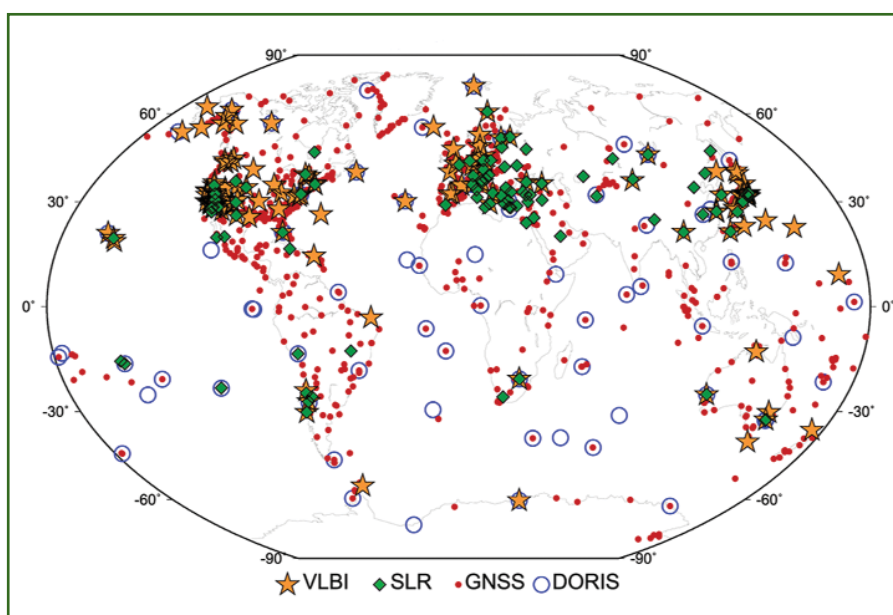


Рис. 5
Схема расположения станций ITRF2014 [17]

большую часть территории стран СНГ, нет. Отсутствует блок ITRF и по части Южной Азии, относящейся к Китаю. Поэтому создание на территории РФ, относящейся к Евразии, самостоятельного блока высокоточной реализации общеземной геоцентрической системы координат, с пунктами фундаментальной астрономо-геодезической сети наблюдений ГЛОНАСС открытого пользования ее реализующими, во многом будут способствовать авторитету ГЛОНАСС и РФ в целом, как равноправного члена IUGG и IAG.

Помимо участия в создании и поддержании глобальных (общеземных) систем координат, высокоразвитые страны с большой территорией одновременно создают национальные системы координат, оптимальным образом ориентированные на реализацию государственного геодезического и картографического потенциала. Характерными примерами национальных систем координат являются системы координат Австралии (Geocentric Datum of Australia — GDA), России (Геодезическая система координат 2011 года — ГСК–2011), США (National Spatial Reference System — NSRS), и Китая (China Geodetic Coordinate System 2000 — CGCS 2000) [12, 18, 19,

33]. Учитывая значительный территориальный охват таких систем координат, их практические реализации достаточно близки к глобальной (общеземной) системе координат.

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 крупномасштабные топографические и навигационные карты [34].

Разработанный в рамках создания ГСК–2011 в ЦНИИГАиК под руководством Г.В. Демьянова эллипсоид («эллипсоид ЦНИИГАиК») наиболее точно соответствует лучшему значению размеров общеземного эллипсоида, определенному IERS на момент последней корректировки системы координат ITRF2008 [16]. При введении системы координат ITRF2014 новые параметры эллипсоида не определялись [17]. Используемые до последнего времени эллипсоиды Красовского (введен Постановлением Совета Министров СССР № 760 от 7 апреля 1946 г.) и GRS80 (принят XVII Генеральной Ассамблеей Международного геодезического и геофизического со-

юза в 1979 г.) не соответствуют современным данным о параметрах общеземного эллипсоида (табл. 2).

▼ Проблема отнесения результатов измерений к одной эпохе

Эта проблема связана не только с периодическим уточнением систем координат WGS–84 (1987, 1994, 1997, 2002, 2012, 2013), ПЗ–90 (1991, 1998, 2002, 2011), ITRF (1994, 1996, 1997, 2000, 2005, 2008, 2014, 2020), но и с необходимостью обработки (регулярного переравнивания) при изменении состава сети пунктов, используемых для установления систем координат. Для рассмотрения данной проблемы в составе подкомиссии SC1.3 IAG по региональным опорным сетям была образована специальная рабочая группа WG 1.3.1 Time Dependent Transformations between Reference Frames (Преобразования, зависящие от времени между системами координат (отсчета)).

Наиболее авторитетной из региональных подкомиссий SC1.3 IAG является региональная подкомиссия по Европе (EUREF) — SC1.3a, включающая не только постоянно действующий аппарат, но и правление. В Резолюции 1, принятой EUREF в 1990 г., рекомендовалось ис-

Параметры эллипсоидов основных систем координат

Таблица 2

Система координат (эллипсоид)	Параметр эллипсоида		Геоцентрическая гравитационная постоянная Земли fM (GM), км ³ /с ²
	Большая полуось a , м	Сжатие $1/\alpha$ (1/f)	
ГСК–2011 (ЦНИИГАиК)	6 378 136,500	298,2564151	398 600,4415
ПЗ–90.11 (ПЗ–90.11)	6 378 136	298,25784	398 600,4418
ITRF2008 (ITRF2014)	6 378 136,6 ±0,1	298,25642 ±0,00001	398 600,4418 ±0,0008
GRS80	6 378 137	298,257222101	398 600,5
WGS–84 (G1762)	6 378 137,0	298,257223563	398 600,4418
СК–95, СК–42, МСК (Красовского)	6 378 245,0	298,3	

пользовать Европейскую земную опорную систему координат ETRS89 (European Terrestrial Reference System), совпадающую с Международной земной опорной системой координат ITRS в эпоху 1989.0 и связанную со стабильной частью Евразийской платформы. Техническая рабочая группа EUREF не рекомендовала использовать ETRF2005, а ограничиться реализацией ETRF2000. Однако, для использования реализаций ITRF2005 и ITRF2008, техническая рабочая группа также рекомендовала, чтобы все станции, расположенные на территории Европы (GNSS, VLBI, SLR и

DORIS), которые включены в ITRF, публиковали координаты и скорости в реализациях ETRF2000 со следующими обозначениями ETRF2000(R05) и ETRF2000(R08).

В настоящее время координаты и скорости станций ITRF, расположенных на территории Европы, были преобразованы в соответствующие реализации ETRF (ETRF89, ETRF90, ETRF91, ETRF92, ETRF93, ETRF94, ETRF96, ETRF97, ETRF2000, ETRF2005, ETRF2014), которые опубликованы на официальном сайте ETRS89 [35].

По утверждению авторов работы [36], после выхода

ITRF2008 в 2010 г. стало все более очевидно, что станции, подвергшиеся воздействию крупных землетрясений, в частности, разрушительных землетрясений на Суматре (2004 г.), в Чили (2010 г.) и Японии (2011 г.), имеют нелинейные траектории после этих трагических событий. Моделирование постсейсмической деформации (PSD) кусочно-линейными функциями, как и в предыдущих версиях ITRF, больше не является подходящим подходом, по крайней мере по тому, что оцененные линейные скорости сегментированных временных рядов станции неточны и не адекватно описывают реальные постсейсмические траектории станции. Вышедшая в 2016 г. версия ITRF2014 предназначена для учета геодинамических явлений, включая постсейсмические деформации. Введение новой версии ITRF2014 связано с тем, что в результате геодинамических явлений, таких как тектонические движения плит, землетрясения, влияние эффектов, генерируемых в атмосфере, циркуляция вод океана и влияние гидрологии суши, происходят современные движения земной поверхности. Обработка данных для введения ITRF2014 была завершена в 2015 г. и опубликована 21 января 2016 г. Скорости движения пунктов по работе [36], размещенной на сайте IERS [17, 36, 37], приведены на рис. 6 и 7.

Окончание следует

Список литературы приведен в электронной версии данной статьи, размещенной на сайте журнала www.geoprofi.ru.

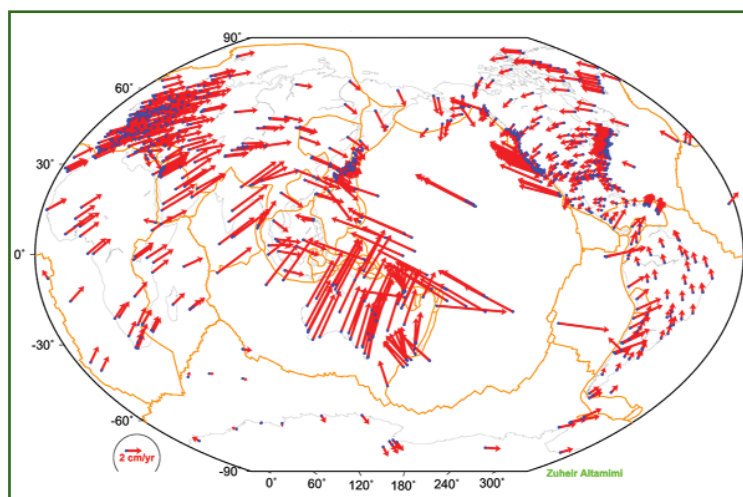


Рис. 6
ITRF2014 поле горизонтальных скоростей [36]

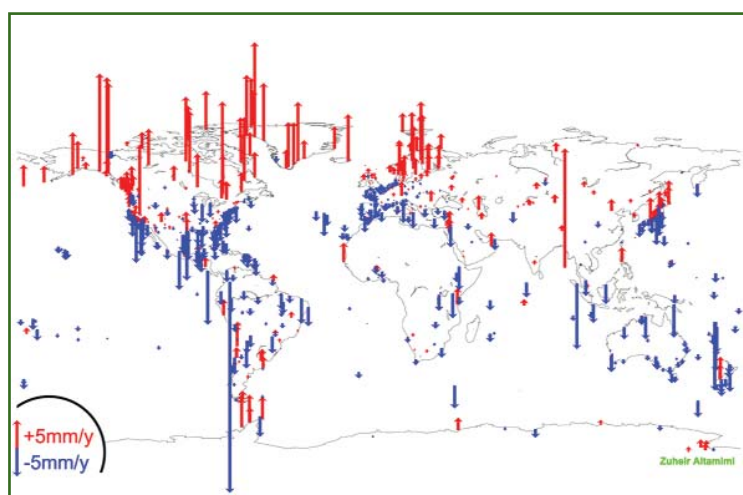


Рис. 7
ITRF2014 поле вертикальных скоростей [36]



Список литературы

(все ссылки на электронные ресурсы актуальны на 25.06.2020 г.)

1. Геодезия, картография, топография, фотограмметрия, геоинформационные системы, пространственные данные. Справочник стандартных (нормативных) терминов. / Под общ. ред. В.Г. Плешкова, Г.Г. Побединского / Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: ООО Издательство «Проспект», 2015. – 672 с. - Авторы-составители: И.Г. Журкин, А.П. Карпик, В.Б. Непоклонов, В.Г. Плешков, Г.Г. Побединский, О.В. Христова.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=28345726>
2. Постановление Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. № 760 «О введении единой системы геодезических координат и высот на территории СССР».
<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=ESU&n=10193#06921708831158676>
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. № 568 (с изм. от 28.12.2012) «Об установлении единых государственных систем координат».
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28045
4. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат».
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140248/
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2016 г. № 1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы».
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207750/
6. Демьянов Г.В. Геодезические системы координат, современное состояние и основные направления развития // Геодезия и картография. — 2008. — № 9. — С. 17–20.
7. Демьянов Г.В., Майоров А.Н., Побединский Г.Г. Местные системы координат, существующие проблемы и возможные пути их решения // Геопрофи. - 2009. - № 2. – С. 52–57.
<http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1065>
8. Демьянов Г.В., Майоров А.Н., Побединский Г.Г. Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России (начало) // Геопрофи. - 2011. - № 2. – С. 11–13.
<http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1381>
9. Демьянов Г.В., Майоров А.Н., Побединский Г.Г. Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России (продолжение) // Геопрофи. - 2011. - № 3. – С. 23–29.
<http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1405>
10. Демьянов Г.В., Майоров А.Н., Побединский Г.Г. Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России (окончание) // Геопрофи. - 2011. - № 4. – С. 15–21.
<http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1421>
11. Демьянов Г.В., Майоров А.Н., Побединский Г.Г. Системы геодезических координат и их развитие на основе применения глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. - 2011. - № 6. – С. 7–11.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=21943050>
12. ГЛОНАСС и геодезия. / Под общей редакцией Г. В. Демьянова, Н.Г. Назаровой, В.Б. Непоклонова, Г.Г. Побединского, Л.И. Яблонского. – М.: ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2016. – 272 с.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=27133277>
13. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» (A/RES/69/266), принятая 26 февраля 2015 г.
http://ggim.un.org/documents/A_RES_69_266_R.pdf
14. Программный документ рабочей группы подкомитета по геодезии Комитета экспертов ООН по управлению глобальной геопространственной информацией.
http://ggim.un.org/meetings/GGIM-committee/9th-Session/documents/GGRF_Position_Paper%20_russian_web.pdf
15. IERS CONVENTIONS (2003) (IERS Technical Note No. 32)
http://www.iers.org/nn_11216/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn32.html
16. IERS Conventions (2010) (IERS Technical Note No. 36).
http://www.iers.org/nn_11216/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html
17. Analysis and results of ITRF2014 / Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux // (IERS Technical Note No. 38).
<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn38.html?nn=94912>
18. Методические вопросы построения глобальных и региональных геодезических сетей» (начало) // Абдрахманов Р.З., Демьянов Г.В., Кафтан В.И., Побединский Г.Г. // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. - № 1(48) . – С. 80–85.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=350923341>

19. Методические вопросы построения глобальных и региональных геодезических сетей» (окончание) // Абдрахманов Р.З., Демьянов Г.В., Кафтан В.И., Побединский Г.Г. // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. - № 2(49). – С. 67–70.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=35099003>
20. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. Изд. 2-е перераб. и доп. - М.: Картгеоцентр, 2004. – 355 с.
<http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-genike-aa-pobedinskiy-gg-globalnye-sputnikovye-sistemy-opredeleniya-mestopo.pdf>
21. GPS: The Global Positioning System.
<https://www.gps.gov/>
22. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) Standardization Document. Department of Defense. World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems. 2014-07-08. Version 1.0.0. NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84.
23. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 (редакция 5.1).
http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf
24. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1.0.
<http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKD.-Obshh.-opis.-Red.-1.0-2016.pdf>
25. Параметры общего земного эллипсоида и гравитационного поля Земли (Параметры Земли 1990 года). – М.: РИО ТС ВС РФ, 1991. – 68 с.
26. Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90). Справочный документ. // В.Ф. Галазин, Б.Л. Каплан, М.Г. Лебедев, В.Г. Максимов, Н.В. Петров, Т.Л. Сидорова-Бирюкова. Под общей редакцией В.В. Хвостова. – М.: Координационный научно-информационный центр, 1998. – 40 с.
27. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 июня 2007 г. № 797-р «Об использовании уточненной версии государственной геоцентрической системы координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.02)».
<http://government.ru/docs/all/60278/>
28. Геометрические и физические числовые геодезические параметры в отношении общеземной геоцентрической системы координат «Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11)». Утверждены приказом Минобороны России от 15 января 2014 г. № 11.
29. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ. ВТУ ГШ ВС РФ. – М., 2014. – 52 с.
<http://structure.mil.ru/files/pz-90.pdf>
30. ITRF Website.
<http://itrf.ign.fr>
31. International Association of Geodesy (IAG).
<http://www.iag-aig.org>
32. International GNSS Service (IGS).
<http://www.igs.org>
33. О создании сетевой информационно-технологической инфраструктуры геодезического обеспечения Российской Федерации / А.В. Басманов, В.П. Горобец, В.И. Забнев, В.И. Зубинский, И.А. Ощепков, Г.Г. Побединский, Р.А. Сермягин, И.А. Столяров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск. Пленарное заседание: сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. - С. 90-106.
<http://geosib.sgugit.ru/collections-of-materials-of-international-scientific-conference-interexpo-geo-siberia-2016/>
34. Обиденко В.И., Побединский Г.Г. Изменение метрических параметров объектов на территории Российской Федерации при переходе к ГСК-2011 // Геодезия и картография. - 2016. - № 10. – С. 12-21.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=27276414>
35. European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89). - <http://etrs89.ensg.ign.fr>
36. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. / Zuheir Altamimi, Paul Rebischung, Laurent Métivier, Xavier Collilieux. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. Volume 121, Issue 8, August 2016. - Pages 6109–6131.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2016JB013098>
37. ITRF2014. Description.
http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014