

Г.Г. Побединский

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ В ГЕОДЕЗИИ И ИХ СВЯЗИ

Учебное пособие

Нижний Новгород
2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Г.Г. Побединский

СИСТЕМЫ КООРДИНАТ В ГЕОДЕЗИИ И ИХ СВЯЗИ

Утверждено редакционно-издательским советом университета в качестве
учебного пособия

Нижний Новгород
ННГАСУ
2023

УДК 528 (075.8)

П 41

ББК 26.11

Печатается в авторской редакции

Рецензенты:

В.И. Кафтан – д-р. техн. наук, главный научный сотрудник ФГБУ «Геофизический центр Российской академии наук»

В.Б. Непоклонов – д-р техн. наук, научный руководитель ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»

Побединский Г.Г. Системы координат в геодезии и их связи [Текст]: учеб. пособие / Г.Г. Побединский; Нижегород. гос.архитектур.-строит. ун-т – Н.Новгород: ННГАСУ, 2023 – 144 с. : ил. ISBN 978-5-528-00559-1

Учебное пособие разработано с учетом современной информации о системах координат и методах их преобразований. Рассмотрены вопросы терминологии, классификации систем координат, даны определения и описания глобальных, континентальных, региональных и местных (локальных) систем координат. Рассмотрены методы преобразования координатных систем и параметры перехода. Отдельно рассмотрены системы геодезических, ортометрических, динамических и нормальных высот.

Предназначено для обучающихся в ННГАСУ по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование, профиль Инфраструктура пространственных данных, по дисциплине «Системы координат в геодезии и их связи».

ББК 26.11

ISBN 978-5-528-00559-1

© Г. Г. Побединский, 2023

© ННГАСУ, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Целями освоения учебной дисциплины Системы координат в геодезии и их связи являются: формирование профессиональных компетенций, определяющих готовность и способность бакалавра геодезии к использованию знаний из области теории фигуры Земли, системах координат, их связи и преобразовании координат пунктов из одной системы координат в другую.

Для изучения данной учебной дисциплины необходимы следующие знания, умения и навыки, формируемые предшествующими дисциплинами:

Знать: объекты дисциплин Геодезия и Высшая геодезия (земной эллипсоид, меридианы, параллели, проекции, системы координат), методы обработки геодезических измерений дисциплины Теория математической обработки измерений, предметы дисциплины Математика (тригонометрические функции, вектора), основные понятия и определения из Высшей геодезии.

Уметь: обрабатывать материалы геодезических измерений.

Владеть: описывать результаты, формулировать выводы.

РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ И ТЕМЫ ЗАНЯТИЙ

Дисциплина включает следующие разделы:

1. Введение

Терминология. Общие сведения о системах координат. Классификация систем координат. Звездные и земные системы координат.

2. Геодезические системы координат

Общие сведения о геодезических системах координат. Основные компоненты геодезической системы координат.

3. Глобальные (общеземные) системы координат

Общеземная система координат WGS-84. Общеземная система координат ПЗ-90. Международная земная опорная система ITRS. Инициатива ООН.

4. Континентальные и национальные системы координат

Европейская система координат (European Terrestrial Reference System - ETRS89). Система координат США (National Spatial Reference System – NSRS). Система координат Канады (Canadian Spatial Reference System – CSRS). Система координат Австралии (Geocentric Datum of Australia – GDA). Система координат Китая (China Geodetic Coordinate System CGCS2000). Система координат Российской Федерации (Геодезическая система координат 2011 года – ГСК-2011).

5. Региональные и местные (локальные) системы координат

Система координат 1963 года (СК-63). Системы координат субъектов Российской Федерации (МСК-NN). Местные (локальные) системы координат.

6. Методы преобразования координатных систем и параметры перехода

Прямое и обратное преобразование прямоугольных геоцентрических координат в геодезические. Прямое и обратное преобразование плоских прямоугольных координат в геодезические. 7-ми параметрическое преобразование координат по Гельмерту.

7. Системы высот

Теория высот в гравитационном поле. Геопотенциальные числа. Высоты геодезические, нормальные, ортометрические и др. Балтийская система высот 1977 года. Европейская система высот EVRF2007. Международная система высот.

8 Определение параметров преобразования координатных систем и некоторые вопросы государственной тайны в сфере геодезии, картографии, ДЗЗ.

Студенту необходимо ознакомиться с программой курса, основным и дополнительным списком рекомендуемой литературы, включающий учебники, учебные пособия по дисциплине, а также основные ресурсы сети интернет.

Учебной программой по дисциплине «Системы координат в геодезии и их связи» на лекции отводится 16 часов – 8 лекций. Практически каждая лекция – это самостоятельная тема. На семинары и практические занятия учебной программой также предусмотрено 16 часов. Основной упор делается на самостоятельное изучение дисциплины – 40 часов. Поэтому в аудитории на лекциях рассматриваются лишь основные положения выбранной темы. Углубление темы будет продолжено на семинарах и практических занятиях. Студенты, используя конспекты лекций и рекомендуемую литературу, самостоятельно полностью прорабатывают лекционный материал, готовятся к устному опросу и контрольной работе по проверке усвоения материала, к выполнению практических занятий, оформлению и сдаче выполненных практических работ, к подготовке рефератов и презентаций по ним. В конечном счёте – подготовке к зачету с оценкой.

Перед сдачей зачета студентам выдается список вопросов, охватывающих основные теоретические и практические аспекты изученного материала. Непосредственно перед зачетом проводится консультация, на которой рассматриваются содержательные и организационные вопросы.

1. Введение

Вопросы терминологии

В последние десятилетия произошли принципиальные изменения не только в технологии геодезических работ, связанные с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Существенные изменения появились в геодезической терминологии.

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.

Понятия международной терминологии «Reference System», «Reference Frame», а также «International Terrestrial Reference System (ITRS)» и «International Terrestrial Reference Frame (ITRF)» введены Международным астрономическим союзом IAU (International Astronomical Union) в 2000 году [96]. Но уже в 2006 году определение «International Terrestrial Reference System (ITRS)» было откорректировано на основе резолюции Международного геодезического и геофизического союза - МГГС (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) [97]. Современные международные термины приведены в таблице 1.

Таблица 1

Reference system Система отсчета	Theoretical concept of a system of coordinates, including time and	Теоретическая концепция системы координат, включая время и
-------------------------------------	--	--

	standards necessary to specify the bases used to define the position and motion of objects in time and space.	стандарты, необходимые для определения оснований, используемых для определения положения и движения объектов во времени и пространстве.
Reference frame Отсчетная основа	Practical realization of a reference system, usually as a catalog of positions and motions of a certain number of fiducial points. For instance, the ICRF is the realization of the ICRS, where the ICRF points have no proper motions.	Практическая реализация системы отсчета, обычно в виде каталога положений и движений определенного числа опорных точек. Например, ICRF - это реализация ICRS, где точки ICRF не имеют собственных движений.
International Terrestrial Reference System (ITRS) Международная земная система отсчета	According to IUGG 2007 Resolution 2, the ITRS is the specific Geocentric Terrestrial Reference System (GTRS) for which the orientation is operationally maintained in continuity with past international agreements (Bureau International de l'Heure (BIH) orientation). The co-rotation condition is defined as no residual rotation with regard to the Earth's surface, and the geocenter is understood as the center of mass of the whole Earth system, including oceans and atmosphere (IUGG 1991 Resolution 2). For continuity with previous terrestrial reference systems, the first alignment was close to the mean equator of 1900 and the Greenwich meridian. The ITRS was adopted (IUGG 2007 Resolution 2) as the preferred GTRS for scientific and technical applications and is the recommended system to express positions on the Earth.	Согласно резолюции 2 IUGG 2007, ITRS - это конкретные геоцентрические земные опорные системы (GTRS), для которых ориентация в оперативном отношении поддерживается в соответствии с прошлыми международными соглашениями (ориентация Международного бюро времени BIH). Условие совместного вращения определяется как отсутствие остаточного вращения относительно поверхности Земли, а геоцентр понимается как центр масс всей земной системы, включая океаны и атмосферу (резолюция 2 IUGG 1991). Для обеспечения преемственности с предыдущими наземными системами отсчета первое выравнивание было близко к среднему экватору 1900 года и Гринвичскому меридиану. ITRS была принята (резолюция 2 IUGG 2007) в качестве предпочтительной геоцентрической земной опорной системы GTRS для научных и технических применений и является рекомендуемой системой для определения местоположения на Земле.
International Terrestrial Reference Frame (ITRF) Международная земная отсчетная основа	A realization of ITRS by a set of instantaneous coordinates (and velocities) of reference points distributed on the topographic surface of the Earth (mainly space geodetic stations and related markers). Currently the ITRF provides a model for estimating, to high accuracy, the instantaneous positions of these points, which is the sum of conventional corrections provided by the IERS Convention center (solid Earth tides,	Реализация ITRS с помощью набора мгновенных координат (и скоростей) опорных точек, распределенных на топографической поверхности Земли (главным образом, космических геодезических станций и связанных с ними маркеров). В настоящее время ITRF предоставляет модель для оценки с высокой точностью мгновенных положений этих точек, которая представляет собой сумму обычных поправок,

	<p>pole tides, ...) and of a “regularized” position. At present, the latter is modeled by a piecewise linear function, the linear part accounting for such effects as tectonic plate motion, postglacial rebound, and the piecewise aspect representing discontinuities such as seismic displacements. The initial orientation of the ITRF is that of the BIH Terrestrial System at epoch 1984.0.</p>	<p>предоставляемых Центром конвенций IERS (приливы твердой Земли, приливы полюсов, ...) и «упорядоченного» положения. В настоящее время последнее моделируется кусочно-линейной функцией, линейная часть которой учитывает такие эффекты, как движение тектонических плит, послеледниковый отскок, а кусочный аспект представляет разрывы, такие как сейсмические смещения. Первоначальная ориентация ITRF - это ориентация земной системы Международного бюро времени BIH в эпоху 1984.0.</p>
--	---	--

Ряд авторов статей на основе понятий астрономии, физики и механики дают рекомендации по переводу и применению понятий международной терминологии «Reference System» и «Reference Frame». Термин «Reference System», предлагается переводить как «Система отсчета», означающий теоретическое (декларативное) описание геометрии пространства и хронометрии. Термин «Reference Frame» предлагается переводить как «Отсчетная основа», которая материализует систему отсчета (Reference System) через реальные объекты. Термин «Система координат» предлагается считать одной из составных частей понятия «Системы отсчета». Термин «Координатная основа» - составной частью понятия «Отсчетная основа». Приводятся теоретические обоснования некорректности применения в геодезической практике России таких терминов как «Геодезическая система координат 2011», «Система геодезических координат 1942», «Система геодезических координат 1995» и замене их на термины «Геоцентрическая координатная основа 2011», «Координатная основа 1942», «Координатная основа 1995» [58, 59, 86, 87].

ГОСТ 22268-76 «Геодезия. Термины и определения» [6] в разделе «Системы координат» содержит несколько терминов, связанных с координатами: геодезические, геоцентрические, плоские прямоугольные и топоцентрические координаты. В тексте стандарта приведен также перевод терминов на немецкий, английский и французский языки (таблица 2).

Таблица 2

<p>Геодезические координаты D. Geodatische Koordinaten E. Geodetic coordinates F. Coordonnees geodesiques</p>	<p>Три величины, две из которых характеризуют направление нормали к поверхности земного эллипсоида в данной точке пространства относительно плоскостей его экватора и начального меридиана, а третья является высотой точки над поверхностью земного эллипсоида</p>
<p>Геоцентрические координаты D. Geozentrische Koordinaten E. Geocentric coordinates F. Coordonnees geocentriques</p>	<p>Величины, определяющие положение точки в системе координат, у которой начало совпадает с центром масс Земли</p>
<p>Плоские прямоугольные геодезические координаты</p>	<p>Прямоугольные координаты на плоскости, на которой отображена по определенному математическому закону</p>

Плоские прямоугольные координаты D. Ebene rechtwinklige Koordinaten E. Plane coordinates F. Coordonnees rectangulaires	поверхность земного эллипсоида
Топоцентрические координаты D. Topozentrische Koordinaten E. Topocentric coordinates F. Coordonnees topocentriques	Координаты, началом счета которых является точка местности

Но этот государственный стандарт не содержал терминов «Система координат» и «Геодезическая система координат», видимо эти термины считались достаточно понятными и общепринятыми.

Терминологическая неопределенность такого основополагающего понятия как «Геодезическая система координат» усугубилась после введения ГОСТ Р 52572-2006 «Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования» [8], соответствующего международному стандарту ISO 19111:2003 «Geographic information - Spatial referencing by coordinates». Этими стандартами были введены такие термины, как:

- прямоугольная система координат - Cartesian coordinate system;
- составная система координат - compound coordinate reference system;
- координатная система отсчета - coordinate reference system;
- система координат - coordinate system;
- геодезическая система координат - ellipsoidal coordinate system geodetic coordinate system;
- полярная система координат - polar coordinate system;
- система координат проекции - projected coordinate reference system.

ГОСТ Р 52572-2006 дополнительно ввел два новых термина «Геодезическая отсчетная основа (геодезическая основа)» и «Координатная основа».

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. Стандарт ISO 19111:2003 был дважды пересмотрен в 2007 и 2019 гг., а в 2009 и 2019 гг. к этому стандарту принимались уточняющие корректировки [103]. Но во всех редакциях определена одна и та же область применения «применим к производителям и пользователям географической информации»

ГОСТ Р 8.699-2010 «Государственная система обеспечения единства измерений. Величины, единицы, шкалы измерений, используемые в глобальной навигационной спутниковой системе» [10], ссылаясь на Конвенции Международной службы вращения Земли и систем координат МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) [98, 99], 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 (International Terrestrial Reference System) определены Международной службой вращения Земли и систем координат МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS). Практические реализации ICRS и ITRS

носят названия ICRF (International Celestial Reference Frame) и ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 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 [10].

В отечественной литературе по 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, доктором технических наук, заведующим геодезическим отделом Центрального ордена «Знак Почета» научно-исследовательского института геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского (ЦНИИГАиК), заведующим кафедрой высшей геодезии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) Глебом Викторовичем Демьяновым (07.04.1939 - 01.06.2014) в период работ по созданию государственной геодезической системы координат 2011 года (ГСК–2011). Одно из первых определений понятие системы координат приведено в его статье «Геодезические системы координат, современное состояние и основные направления развития», опубликованной в 2008 году в журнале «Геодезия и картография» [48]. Затем это определение использовалось в более поздних публикациях, в том числе в монографии «ГЛОНАСС и геодезия» - одной из последних работ Г. В. Демьянова, в которой он является научным редактором, соавтором большинства разделов, которую он непосредственно редактировал в последние годы жизни и которая вышла в свет после его смерти [5].

Наиболее лаконичное определение термина «Геодезическая система координат» сформулировано в серии статей «Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России», опубликованной в трех номерах журнала «Геопрофи» в 2011 году [50, 51, 52]. «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 для общеземной системы координат применяют устоявшиеся термины «International Terrestrial Reference System (ITRS)» и «International Terrestrial Reference Frame (ITRF)» [96, 97, 98, 99, 104, 115, 116].

В официальных документах ООН на русском языке, одном из 6 официальных языков ООН (английский, французский, испанский, русский, китайский и арабский), термин «Глобальная геодезическая система координат»

используется именно в такой интерпретации [28, 79]. В этих же документах ООН на английском языке применяется термин «Global Geodetic Reference Frame».

В резолюции Генеральной Ассамблеи ООН «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» [28] 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 глобальной геодезической системы координат и региональных геодезических сетей, целенаправленно развивать и поддерживать соответствующую национальную геодезическую инфраструктуру в качестве важного средства совершенствования глобальной геодезической системы координат, осуществлять многостороннее сотрудничество для устранения инфраструктурных пробелов и дублирования усилий в контексте разработки более надежной глобальной геодезической системы координат [28]. Механизмы управления для поддержания глобальной геодезической системы координат кратко сформулированы в программном документе рабочей группы подкомитета по геодезии Комитета экспертов ООН по управлению глобальной геопространственной информацией [79].

Более подробно вопросы терминологии по тематике геодезические системы координат рассмотрены в работах «Системы координат глобальные, континентальные, региональные, национальные: состояние, проблемы, перспективы» [21], «Глобальная геодезическая система координат и предложения по участию РФ в ее создании» [22, 23], «Государственные системы координат: Анализ состояния и перспектив» [46].

Учитывая то, что терминология должна развиваться в направлении детализации понятий и терминов, в последние годы в отечественной геодезии сформировалось обобщающее понятие системы координат, как совокупности уже трех составляющих: математических правил, исходных геодезических дат, закрепленных на местности пунктов геодезических сетей и каталогов их координат.

Уточненное определение термина будет следующим. Геодезическая система координат – геодезическая категория, определяемая совокупностью трех компонент:

- математических правил, декларативно описывающих характеристики системы;

- принципов ориентирования координатных осей, фиксации начала координат, параметров эллипсоида и др.;

- практической реализации системы координат в виде опорных геодезических сетей, представляющих собой совокупность геодезических пунктов, закрепленных на поверхности Земли, каталогов их координат и скоростей перемещений на заданную эпоху.

Дальнейшее изложение мы будем продолжать, используя этот отечественный термин, иногда его конкретизируя.

Классификация систем координат

Все системы координат можно классифицировать по ряду признаков. Один из примеров классификации приведен в работе «Классификация систем координат, применяемых в космической геодезии» [13]. Можно выделить 6 основных признаков систем координат.

1. По расположению начала системы координат. Геоцентрическая, квазигеоцентрическая, топоцентрическая и др.

2. По виду координатных линий. Прямоугольная, криволинейная: сферическая, сфероидическая (эллипсоидальная, геодезическая) и др.

3. По ориентированию основной координатной плоскости. Экваториальная, горизонтальная (горизонтная), орбитальная и др.

4. По ориентированию координатных осей. Земная, звездная.

5. По периоду действия. Средняя, истинная (мгновенная).

6. По территориальному охвату (назначению). Глобальная (общеземная), континентальная, национальная, региональная и локальная (местная).

Классификационные признаки систем координат приведены в таблице 3.

Таблица 3

Классификационный признак системы координат	Наименование	Описание классификационного признака	Пример обозначения
Расположение начала системы координат	Геоцентрическая	Начало расположено в центре масс Земли	X, Y, Z
	Квазигеоцентрическая	Начало расположено вблизи центра масс Земли	X_G, Y_G, Z_G
	Топоцентрическая	Начало расположено на поверхности Земли	$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$,
	Селеноцентрическая	Начало расположено в центре масс Луны	x_c, y_c, z_c
Вид координатных линий	Прямоугольная	Определяется направлением нормали к основной координатной плоскости	X, Y, Z
	Сферическая	Определяется направлением нормали к поверхности сферы.	φ, λ, R
	Сфероидическая (эллипсоидальная, геодезическая)	Определяется направлением нормали к поверхности эллипсоида	B, L, H
Ориентировка основной	Экваториальная	Плоскость экватора или параллельная плоскость	x, y, z α, δ, ρ

координатной плоскости	Горизонтальная (горизонтная)	Плоскость горизонта или параллельная плоскость	X_H, Y_H, Z_Y
	Орбитальная	Плоскость орбиты или параллельная плоскость	ζ, η, ξ (кси, эта, дзета)
Период действия	Средняя	Система связана со средней точкой γ или G и средним полюсом мира P_m или средним полюсом Земли P	X, Y, Z α, δ, ρ
	Истинная (мгновенная)	Система связана с истинной точкой γ' или G' и истинным полюсом мира P'_m или мгновенным полюсом Земли P'	X', Y', Z' α', δ', ρ'
Территориальный охват (назначение)	Глобальная (общеземная)	Система связана с пунктами глобальной (общеземной) сети	$X_{ITRF}, Y_{ITRF}, Z_{ITRF}$
	Континентальная	Система связана с пунктами континентальной сети	$X_{ETRF}, Y_{ETRF}, Z_{ETRF}$
	Национальная	Система связана с пунктами национальной сети	$X_{ГСК-2011}, Y_{ГСК-2011}, Z_{ГСК-2011}$
	Региональная	Система связана с пунктами региональной сети	$X_{ETRF}, Y_{ETRF}, Z_{ETRF}$
	Локальная (местная)	Система связана с пунктами локальной (местной) сети	$X_{МСК}, Y_{МСК}, Z_{МСК}$

Любая выбранная система координат может быть определена по классификационным признакам. Например, система геодезических координат 1942 года (СК-42) это квазигеоцентрическая, сфероидическая (эллипсоидальная), экваториальная, земная, средняя, национальная система координат. В силу своей уникальности, проработанности и в отсутствии альтернативы СК-42 длительное время использовалась в качестве глобальной системы координат.

Международная система координат ITRS это геоцентрическая, прямоугольная, экваториальная, земная, средняя, глобальная система координат. В настоящее время известны 10 реализаций этой системы ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014, ITRF2020 [115].

Геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) в свою очередь это геоцентрическая, прямоугольная, экваториальная, земная, средняя, национальная система координат. В силу существенного совпадения с ITRF2008, ГСК-2011 может быть отнесена к глобальной системе координат.

Европейская система координат ETRS [94], основанная на европейской сети пунктов EPN (EUREF Permanent GNSS Network) [93] это геоцентрическая, прямоугольная, экваториальная, земная, средняя, континентальная система координат. В настоящее время известны 11 реализаций этой системы ETRF89, ETRF90, ETRF91, ETRF92, ETRF93, ETRF94, ETRF96, ETRF97, ETRF2000, ETRF2005, ETRF2014 [94].

Система координат Нижегородской области МСК-52 это квазигеоцентрическая, прямоугольная, экваториальная, земная, средняя, региональная система координат.

Общие сведения о звездных (небесных) и земных системах координат

При использовании современных технологий геодезического использования глобальных спутниковых навигационных систем, как правило, применяют два вида систем координат, одна из которых жестко связана с Землей (земная или геодезическая), а другая - с окружающим пространством (небесная или звездная). Первая служит для определения местоположения пункта или геодезического приемника на земной поверхности, а вторая для определения местоположения спутника или космического аппарата (КА) на орбите.

Для описания пространственного движения космического аппарата относительно центра масс Земли наиболее приемлемой является инерциальная система координат, не вращающаяся вместе с Землей. В инерциальной системе координат начало помещается в некоторой точке пространства, либо перемещается с постоянной скоростью, направление осей в пространстве при этом сохраняется неизменным.

Для того чтобы определить положение объекта в земной координатной системе при помощи спутниковой технологии мы должны знать положение спутников в земной системе. Однако эфемериды спутников обычно определяют в небесных координатах, так как уравнения движения спутников формулируются и решаются в небесной системе координат, поскольку это более строго соответствует инерциальной отсчетной системе. Поэтому формулы преобразования между земной и небесной координатными системами должны быть известны с высокой точностью. Важной проблемой является также тот факт, что спутниковые данные являются по своей природе общеземными, тогда как наземные геодезические сети, создаваемые на основе спутниковых технологий, могут охватывать как весь земной шар, так и ограниченные регионы земной поверхности. Поэтому правильность установления соотношения между глобальной спутниковой сетью и локальными геодезическими сетями имеет крайне важное значение.

Звездные (небесные) системы координат

При описании движения спутников используется звездная система координат, которая может быть как сферической, так и декартовой. Применительно к изучению движения небесных тел преимущественное распространение получила сферическая система координат. При описании движения спутников преимущественное распространение получила декартова система координат.

В качестве таковой примем прямоугольную геоцентрическую экваториальную звездную систему координат $(OXYZ)'$, начало которой совмещено с центром масс Земли. Ось аппликата Z' совпадает с ее истинной осью вращения. Ось абсцисс X' направлена в истинную точку весеннего равноденствия, которая лежит в плоскости истинного экватора в момент времени t_1 . Обычно за эту эпоху принимается момент задания начальных условий движения спутника.

Ось ординат Y' дополняет систему до правой. Такая система координат называется истинной звездной.

Для этой же цели широко применяется средняя звездная система координат ($OXYZ$), начало которой совмещено с центром масс Земли. Ось аппликата Z совпадает с ее средней осью вращения. Ось абсцисс X направлена в среднюю точку весеннего равноденствия γ , которая лежит в плоскости среднего экватора в начальную эпоху t_0 . Ось ординат Y дополняет систему до правой. Такая система координат называется средней звездной (рис. 1).

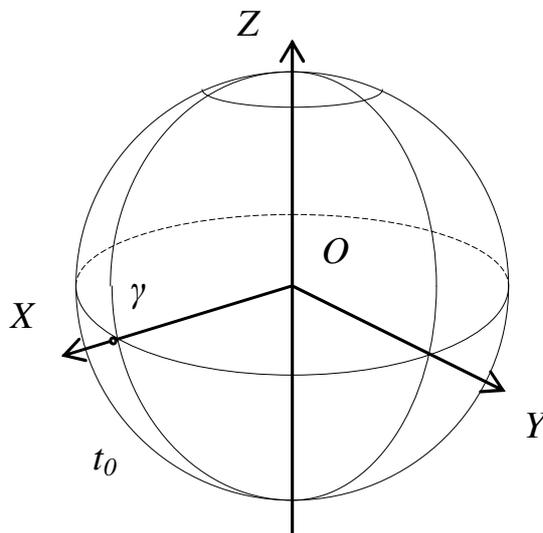


Рис. 1. Прямоугольная геоцентрическая экваториальная звездная система координат

В общем случае звездные системы координат не являются инерциальными, так как ось вращения Земли постоянно меняет свою ориентировку в пространстве. Это сложное перемещение раскладывается на две составляющие: прецессию и нутацию.

Прецессия (от лат. praecessio – опережающее движение). Силы притяжения пытаются совместить плоскость экватора Земли с плоскостью её орбиты, однако из-за вращения Земли этого не происходит. Возникает момент сил, заставляющий ось вращения Земли примерно за 25 800 лет описывать в пространстве конусообразную поверхность. Эти перемещения напоминают круговые движения оси вращающегося волчка. Осью конуса является ось эклиптики – перпендикуляр к плоскости земной орбиты. Полнос Мира перемещается на небесной сфере по окружности, угловой радиус которой равен $23^{\circ}26'$ и меняется за тысячелетия от $21^{\circ}58'$ до $24^{\circ}36'$. В наше время северной полярной является звезда α созвездия Малой Медведицы. 4 500 лет назад над северным полюсом была звезда α из созвездия Дракона. Через 2 000 лет полярными станут звезды созвездия Цефей, а через 12 000 – звезды созвездия Лиры. Прецессию открыл во II в. до н. э. греческий астроном Гиппарх. Ее сущность объяснил И. Ньютон.

Нутация (от лат. nutatio – колебание). Из-за непрерывного изменения взаимного положения Земли, Солнца и Луны на прецессионное перемещение земной оси вращения накладываются периодические колебания, называемые нутацией. Нутация состоит из целого ряда колебательных движений с периодами 18,67 года, 1 год, 1/2 года, 27,32 суток, 13,66 суток и т.д. Амплитуда гармоники

периода 18,67 лет не превышает 9". Явление нутации и ее главный период открыл английский астроном Джеймс Брэдли (James Bradley) устаревшее написание его фамилии Брадлей (1726-1747).

Во многих геоцентрических небесных и земных системах начало координат располагается в центре масс Земли. Оценка стабильности положения начала геоцентрических систем координат по результатам наблюдений внегалактических точечных радиоисточников, по данным лазерной локации искусственных спутников Земли, измерений с использованием ГНСС показывают, что смещения колеблются от нескольких миллиметров до первых сантиметров. Колебания носят сложный характер, но преобладают годовые и полугодовые гармоника, отражающие приливные явления [57].

Спутники вращаются вокруг Земли по эллиптическим орбитам. Если бы Земля представляла собой однородную сферу, а спутник представлял бы собой материальную точку, на которую не воздействуют никакие силы кроме притяжения Земли, то в соответствии с законами Кеплера орбита спутника была бы плоским неизменным эллипсом, один из фокусов которого совпадал бы с центром масс Земли. Реальный спутник подвержен воздействию возмущающих ускорений, поэтому форма орбитального эллипса и его ориентация в пространстве меняются со временем. Для точного определения местоположения реального спутника используется орбитальная система координат (рис. 2).

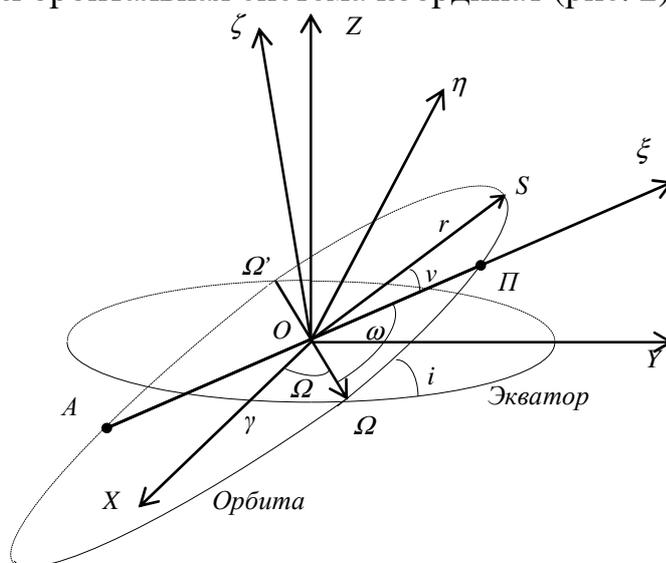


Рис. 2. Элементы орбитальной системы координат

Элементы орбиты можно разделить на три группы, характеризующие:

- положение орбиты в пространстве;
- размер и форму орбиты;
- положение спутника.

Начало орбитальной системы координат совпадает с центром масс Земли. За опорную плоскость принимается средняя плоскость земного экватора. Точка пересечения орбиты с плоскостью экватора, когда спутник переходит из южной полушеры в северную, называется восходящим узлом и обозначается символом

Ω . Противоположная точка называется нисходящим узлом и обозначается символом Ω' . Местоположение восходящего узла определяется величиной, имеющей смысл прямого восхождения и называется долготой восходящего узла Ω . Она отсчитывается от точки весеннего равноденствия до восходящего узла орбиты. На орбите существуют две точки: перигея P (точка перигея) и апогея A (точка апогея). Угол между направлениями на восходящий узел Ω и перигея P , отсчитанный от Ω по направлению движения ИСЗ, называется аргументом перигея и обозначается символом ω . Угол i между плоскостью экватора и плоскостью орбиты называется наклоном орбиты. Угловое удаление спутника S от оси перигея P называется истинной аномалией, отсчитывается по ходу движения ИСЗ и обозначается символом ν . Сумма аргумента перигея ω и истинной аномалии ν называется аргументом широты u . Размер и форма орбиты характеризуется: размером большой и малой полуосей орбиты a и b . Практически для характеристики орбиты используют большую полуось a и эксцентриситет e . Элементом третьей группы является момент τ прохождения спутником перигея. Его ещё называют динамическим элементом.

Прямоугольная орбитальная система координат определена осями ζ, η, ξ (кси, эта, дзета):

- ζ – перпендикулярна плоскости орбиты;
- ξ – проходит через перигея;
- η – дополняет систему координат до левой.

Поскольку движение реального спутника подвержено влиянию возмущающих ускорений, то элементы орбиты должны быть известны в конкретный момент времени. Элементы, характеризующие орбитальное движение спутника на исходную эпоху в совокупности с параметрами, определяющими изменения этих элементов с течением времени, составляют эфемериды спутника. Каждый спутник ГНСС транслирует свои эфемериды в составе навигационного сообщения.

Земные системы координат

Пространственное положение пункта или геодезического приемника на земной поверхности удобнее всего определять в системах координат жестко связанных с вращающейся Землей. В ряде случаев в них бывает также удобно определять пространственные положения естественных и искусственных небесных тел. У этих систем ось аппликата совмещается с осью вращения Земли и направляется в сторону ее северного полюса. В качестве основной координатной плоскости принимается плоскость земного экватора, а за начальный меридиан - меридиан Гринвича.

Наиболее часто используются прямоугольные экваториальные геоцентрические координаты, связанные с общим земным эллипсоидом или референц-эллипсоидом - это общеземная (гринвичская) и референцная (геодезическая) система.

ГОСТ 22268-76 «Геодезия. Термины и определения» [6] в разделе «Фигура Земли» содержит несколько терминов, связанных с понятием «эллипсоид»:

- земной эллипсоид - эллипсоид, который характеризует фигуру и размеры Земли;

- референц-эллипсоид - земной эллипсоид, принятый для обработки геодезических измерений и установления системы геодезических координат;

- уровенный эллипсоид - земной эллипсоид, принятый для обработки геодезических измерений и установления системы геодезических координат.

В геодезической литературе продолжительное время противопоставлялись понятия «общеземной эллипсоид», относимый к глобальным (общеземным) системам координат, и «референц-эллипсоид», относимый к континентальным, региональным и местным (локальным) системам координат.

В последнее время мировой практике термин «референцный» приобрел смысл «принятый для использования». Его применяют как к системам международного общеземного значения (GRS-80, ITRS), так и к региональным системам, например Европы (ETRS). Этот вывод справедлив и для СК-42 и референц-эллипсоида Красовского. В отечественной практике система координат СК-42 и референц-эллипсоид Красовского использовался для выполнения геодезических и картографических работ на территории страны. Но одновременно эта же система координат на референц-эллипсоиде Красовского использовалась для выполнения геодезических и картографических работ на зарубежных территориях. Таким образом «референц-эллипсоид Красовского» по сути, являлся «принятым для использования» не только на территории страны, но на территории всей Земли.

Начало средней земной (общеземной или гринвичской) системы координат $(OXYZ)_G$ расположено в центре масс Земли, ось аппликат Z_G направлена к среднему полюсу P Земли 1900-1905 гг. Ось абсцисс X_G направлена в точку пересечения среднего гринвичского меридиана со средним земным экватором 1900-1905 гг. Ось ординат Y_G дополняет систему до правой. За средний меридиан Гринвича принимается плоскость, содержащая вектор силы тяжести в обсерватории Гринвича и параллельная средней оси вращения Земли. Плоскость среднего меридиана Гринвича не содержит среднюю ось вращения Земли (рис. 3).

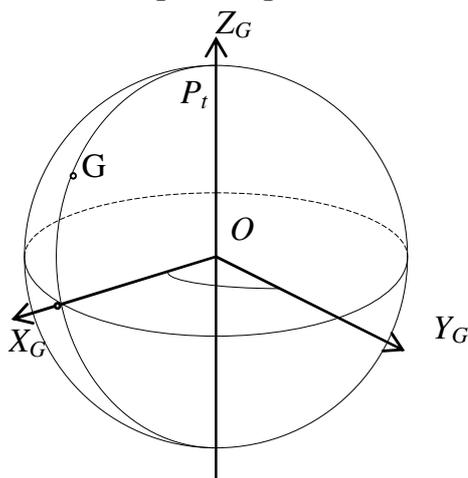


Рис. 3. Средняя общеземная гринвичская система координат

Начало референцной системы координат $(OXYZ)_Г$ совмещается с центром выбранного референц-эллипсоида. Ось аппликат $Z_Г$ совпадает с осью вращения этого эллипсоида. За ось абсцисс $X_Г$ принимается линия пересечения плоскости экватора референц-эллипсоида и плоскости начального гринвичского меридиана,

заданного геодезическими датами в исходном пункте. Ось ординат Y_T дополняет систему до правой.

Кроме прямоугольных экваториальных геоцентрических координат получили распространение сферическая (геоцентрическая) и эллипсоидальная (геодезическая) системы координат.

Начало сферической (геоцентрической) системы координат совмещается с центром выбранного референц-эллипсоида или аппроксимирующей его сферы. Положение точек в сферической (геоцентрической) системе координат определяется геоцентрической широтой φ , геоцентрической долготой λ и геоцентрическим радиус-вектором R .

Начало эллипсоидальной (геодезической) системы координат совмещается с центром выбранного общеземного или референцного эллипсоида, параметры которого определены большой a и малой b полуосями эллипсоида или большой полуосью a и эксцентриситетом e , определяемым по формуле:

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}.$$

Положение точек в эллипсоидальной (геодезической) системе координат определяется геодезической широтой B , геодезической долготой L и геодезической высотой H .

Соотношения между некоторыми системами координат

Соотношения между некоторыми основными системами координат приведены ниже. Связь между прямоугольной и сферической геоцентрическими системами координат определяется следующими соотношениями (рис. 4):

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; & x &= R \cos \varphi \cos \lambda; \\ \sin \varphi &= \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}; & y &= R \cos \varphi \sin \lambda; \\ \tan \lambda &= \frac{y}{x}; & z &= R \sin \varphi. \end{aligned} \tag{1}$$

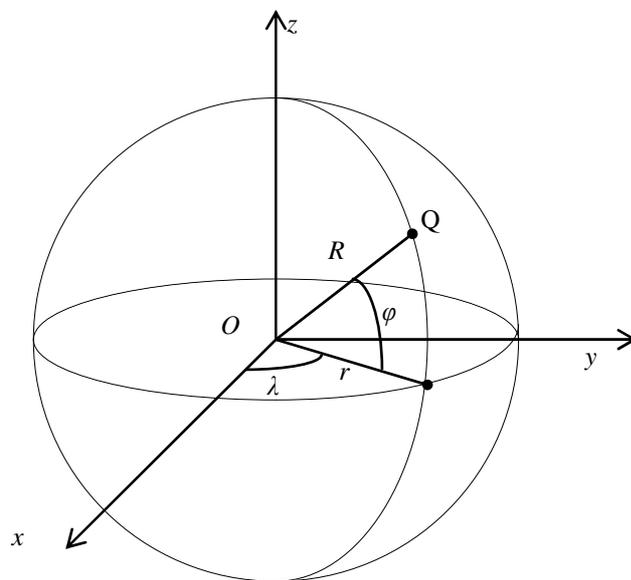


Рис. 4. Прямоугольные и сферические системы координат

Зависимость между эллипсоидальной широтой B и геоцентрической широтой φ определяется формулой (рис. 5):

$$\tan \varphi = (1 - e^2) \tan B ,$$

где e - эксцентриситет эллипсоида.

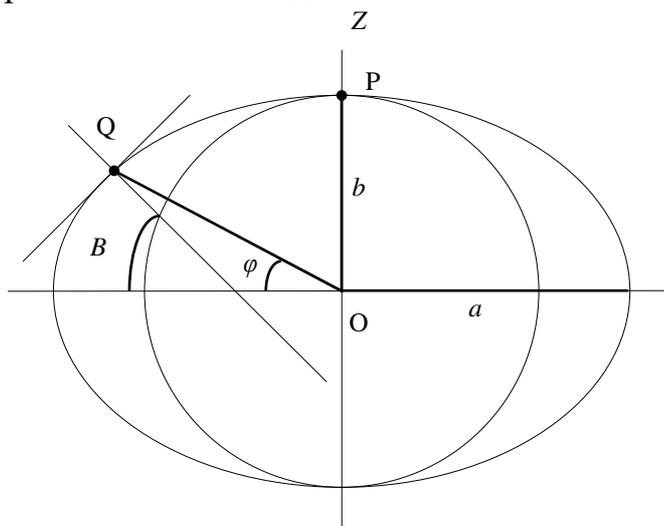


Рис. 5. Эллипсоидальная и геоцентрическая широта

Связь между прямоугольной и эллипсоидальной системами координат определяется соотношениями (рис. 6):

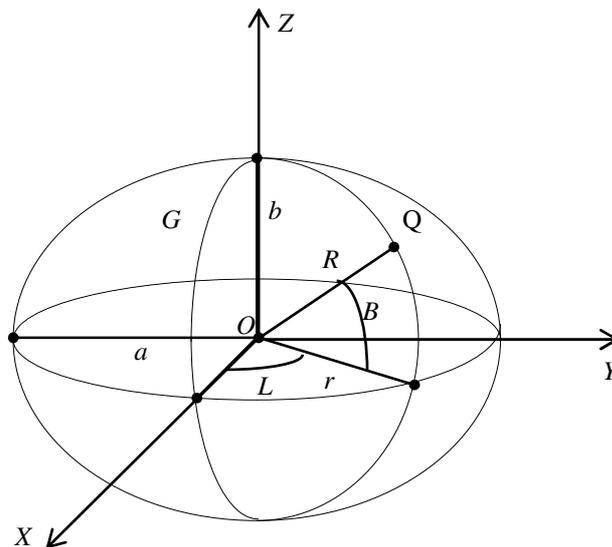


Рис. 6. Прямоугольные и эллипсоидальные системы координат

$$\begin{aligned}
 R &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; & X &= N \cos B \cos L; \\
 & & Y &= N \cos B \sin L; \\
 \tan L &= \frac{Y}{X}; & Z &= \frac{b^2}{a^2} N \sin B,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где N - радиус кривизны первого вертикала, определяемый по формуле:

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 (\cos B)^2 + b^2 (\sin B)^2}} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 (\sin B)^2}},$$

где a и b - соответственно большая и малая полуоси эллипсоида, e - эксцентриситет эллипсоида.

Эллипсоидальная широта B определяется приближениями.

Более подробно вопросы преобразования координат из одной системы в другую будут рассмотрены в следующих разделах курса.

2. Геодезические системы координат

Исходя из классического определения в геодезической системе координат положение точки определяется широтой B и долготой L и высотой H над принятым общеземным или референцным эллипсоидом,.

Геодезическая широта определяется как угол, образованный нормалью к поверхности эллипсоида с плоскостью его экватора. Геодезическая долгота - это двугранный угол между плоскостями начального меридиана и меридиана данной точки.

Такая эллипсоидальная система координат применяется при обработке наземных геодезических измерений. В космической геодезии при создании спутниковых геодезических сетей, которые являются пространственными и физически не связаны с какой-либо отсчетной поверхностью, более удобна система пространственных прямоугольных координат X, Y, Z . Преобразование эллипсоидальных геодезических координат в прямоугольные осуществляется по уточненным формулам (2):

$$\begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L ; \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L ; \\ Z &= \frac{b^2}{a^2} (N + H) \sin B , \end{aligned} \quad (3)$$

где N - радиус кривизны первого вертикала. a и b - соответственно большая и малая полуоси референц-эллипсоида (рис. 6).

Переход от X, Y, Z к B, L, H неизбежно связан с итерациями при вычислении широты B и высоты H . Удобные для вычисления на ЭВМ формулы можно получить из выражения (3):

$$\begin{aligned} \tan L &= \frac{Y}{X} ; \\ \tan B &= c + d \tan B , \end{aligned} \quad (4)$$

где $c = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$, $d = \frac{Ne^2}{N+H}$.

Формулы (4) позволяют организовать цикл приближений. Для первого приближения принимается $\tan B = c$.

Для второго и последующих приближений по значению B из предыдущего приближения вычисляют значения:

$$\begin{aligned} H &= \sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \sec B - N ; \\ N &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2(\sin B)^2}} . \end{aligned}$$

После чего повторяют вычисления B по формуле (4). Процесс приближений заканчивается при пренебрежимо малом расхождении ΔB из двух последних приближений. Практически для достижения расхождения $\Delta B = 0,03''$ во всех случаях достаточно трех приближений.

И эллипсоидальная и пространственная прямоугольные системы координат являются геодезическими по определению, несмотря на различия между ними.

При обработке континентальных и региональных геодезических сетей используются различные геодезические координатные системы. Сведения о некоторых геодезических системах приведены в таблице 4.

Таблица 4

Референц-эллипсоид	Год вычисления	Большая полуось a , м	Сжатие α	Страны, использующие референц-эллипсоид
Бесселя	1841	6 377 397	1:299,2	Европы, Азии
Эйри	1849	6 377 563	1:299,3	Великобритания, Ирландия
Деламбра	1810	6 376 428	1:311,5	Бельгия
Датский		6 377 104	1:300,0	Дания, Исландия
Плессиса		6 376 523	1:308,6	Франция
Струве		6 378 298	1:294,7	Испания
Хейфорда	1909	6 378 388	1:297,0	Европы, Азии, Южной Америки, Антарктида
Эвереста	1830	6 377 276	1:300,8	Индия, Пакистан, Непал, Шри Ланка
Кларка	1858	6 378 293	1:294,3	Австралия, Ирландия
Кларка	1866	6 378 206	1:295,0	Северной и Центральной Америки
Кларка	1880	6 378 249	1:293,5	Африки, Барбадос, Ямайка, Израиль, Иордания, Иран

Красовского (СК-42)	1940	6 378 245	1:293,8	Страны Восточной Европы и Средней Азии, Антарктида
Австралийский	1984	6 378 160	1:298,2	Австралия, Папуа-Новая Гвинея

Каждая из референчных систем имеет свой исходный пункт, на котором осуществлено «внешнее» ориентирование «своего» референц-эллипсоида. Сведения о исходных пунктах основных эллипсоидов приведены в таблице 5 [2].

Таблица 5

Страна	Эллипсоид, начальный пункт	Широта	Долгота
Австралия	Австралийский, Джонстон Оригон	-25°56'54,6"	+133°12'30,1"
Алжир, Тунис	Кларка 1880, Карфаген	+36 51 06,5	+10 19 20,6
Великобритания	Эйри, Гринвич	+51 28 39,7	0 00 00,0
Египет	Хейфорда, Гельмерта, Трэнзит-оф-Винес	+30 01 42,9	+31 16 37,0
Индия, Бирма, Пакистан	Эвереста, Калианпур	+24 07 11,3	+77 39 17,6
Италия	Хейфорда, Рим, Монте-Марио	+41 55 25,5	+12 27 08,4
Канада, США, Мексика	Кларка 1866, Мидс-Рэнч, штат Канзас	+39 13 26,7	-98 32 30,5
КНР	Бесселя, Нанкин	+32 03 26,4	+118 46 56,0
Польша	Бесселя, Борова Гура	+52 28 32,8	+21 02 12,1
СССР	Красовского, Пулково	+59 46 18,5	+30 19 38,6
Франция	Кларка 1880, Париж	+48 50 46,5	+2 20 48,6
Чехословакия, Югославия, Австрия	Бесселя, Германскогль	+48 16 15,3	+16 17 56,0
Швеция	Бесселя, Стокгольм	+59 20 32,7	+18 03 29,6
Страны Европы	Хейфорда, Потсдам	+52 22 51,4	+13 03 58,9

При таком ориентировании совмещается отвесная линия на исходном пункте с нормалью к референц-эллипсоиду, а плоскость меридиана исходного пункта устанавливается параллельно оси вращения Земли по астрономическому азимуту. При этом отвесную линию и азимут на исходном пункте определяют по астрономическим наблюдениям. Неучет уклонений отвесных линий на исходном пункте, так же как и отличие формы и размеров принятого референц-эллипсоида от общеземного, приводит к сдвигу начала системы координат (центра референц-эллипсоида) относительно центра масс Земли, не нарушая параллельности малой оси референц-эллипсоида с осью вращения Земли [2]. Поэтому для каждого исходного пункта будет своя геодезическая система координат. Если на исходном пункте азимут был определен с погрешностью dA и имеются уклонения отвеса, отличные от нуля

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_A - B \\ (\lambda_A - L) \cos \varphi \\ H_A - H \end{pmatrix}, \quad (5)$$

то будет иметь место не только сдвиг начала системы координат на ξ , η , ζ , но и перекос координатных осей. Направляющие косинусы новых осей относительно старых в этом случае имеют вид [2]:

$$\begin{pmatrix} 1 & (dA \sin B - \eta \cos B) & - \begin{pmatrix} dA \cos B \sin L + \\ + \xi \cos L + \\ + \eta \sin B \sin L \end{pmatrix} \\ -(dA \sin B - \eta \cos B) & 1 & \begin{pmatrix} dA \cos B \sin L - \\ - \xi \sin L + \\ + \eta \sin B \cos L \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} dA \cos B \sin L + \\ + \xi \cos L + \\ + \eta \sin B \sin L \end{pmatrix} & - \begin{pmatrix} dA \cos B \sin L - \\ - \xi \sin L + \\ + \eta \sin B \cos L \end{pmatrix} & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Общеземная система координат

Как и всякая другая геодезическая система, общеземная система координат определяется параметрами земного эллипсоида, гравитационным полем Земли и координатами пунктов на физической поверхности Земли. Начало системы координат располагается в центре масс Земли. Направления ее осей были зафиксированы на XIV Генеральной ассамблее Международной ассоциации геодезии (МАГ) в 1967 г. [2]. Малая ось общего земного эллипсоида совмещена со средней осью вращения Земли. Пространственное направление средней оси вращения Земли закреплено относительно звезд координатами среднего полюса на среднюю эпоху 1900 - 1905 гг. – Международное условное начало (МУН) - Conventional International Origin (CIO). После введения поправок за нутацию эта точка в соответствии с рекомендациями Международной службой вращения Земли и систем координат МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) известна как Условный Земной Полюс СТР (Conventional Terrestrial Pole). Его перемещение относительно мгновенного полюса вначале определялось Международной службой полюса по наблюдениям на шести широтных станциях, расположенных на разных долготах примерно на параллели 39° северной широты. Координаты широтных станций приведены в таблице 6 [2].

Таблица 6

Страна	Название станции	Широта	Долгота
Сардиния	Карлсфорте	+39°08'08,9"	+08°18'43,5"
Узбекистан	Китаб	+39 08 01,7	+66 52 55,5
Япония	Мудзусава	+39 08 03,4	+141 07 51,9
США	Юкайа	+39 08 12,0	-123 12 34,5
США	Цинциннати	+39 08 19,8	-84 25 21,0
США	Гейтерсберг	+39 08 13,2	-77 11 57,0

В настоящее время положение полюса относительно МУН (координаты x_p , y_p) определяют с ошибкой в несколько сантиметров из регулярных наблюдений выполняемых методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) – Very Long Baseline Interferometry (VLBI).

Плоскость начального меридиана устанавливается определением начала счета долгот как результат обработки долготных наблюдений национальных служб времени, сотрудничающих в рамках Международного бюро времени ВИН (Bureau International de l'Heure). Начало счета долгот задается принятыми долготами национальных служб после учета поправок за движение полюса и соответствует точке на среднем экваторе в период 1900-1905 гг. вблизи Гринвичского меридиана [2].

По форме общеземная система координат может быть эллипсоидальной (B , L , H) и пространственной прямоугольной (X , Y , Z). Переход между ними осуществляется по формулам (3) и (4). В космической геодезии более удобно использовать пространственную прямоугольную систему.

Составной частью общеземной системы координат являются координаты пунктов, закрепленных на физической поверхности Земли и объединенных в геодезические сети. Различия общеземных координатных систем связаны с особенностями построения и обработки геодезических сетей.

Наиболее известной из современных общеземных геоцентрических систем координат является ITRS (International Terrestrial Reference System), которая поддерживается Международной службой вращения Земли и систем координат МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) [115].

Топоцентрическая система координат

Иногда наряду с геоцентрической геодезической системой координат удобно использовать топоцентрическую систему. В этой системе (рис. 7) определяется взаимное положение пунктов. Прямоугольные координаты ΔX , ΔY , ΔZ в этой системе будут равны разности геоцентрических координат пункта и начала координат топоцентрической системы:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Сферические координаты в топоцентрической системе могут быть определены длиной стороны D_{12} и углами Λ и Φ , аналогичными углам γ и δ в звездной системе координат. Если за основную плоскость XOY принята плоскость, параллельная экватору, то в этой плоскости угол Λ_{12} отсчитывается от меридиана Гринвича до проекции линии 1 2, а угол Φ_{12} характеризует наклон линии 1 2, к экватору. Углы Λ и Φ в экваториальной топоцентрической системе иногда называют ориентирующими углами хорды D_{12} .

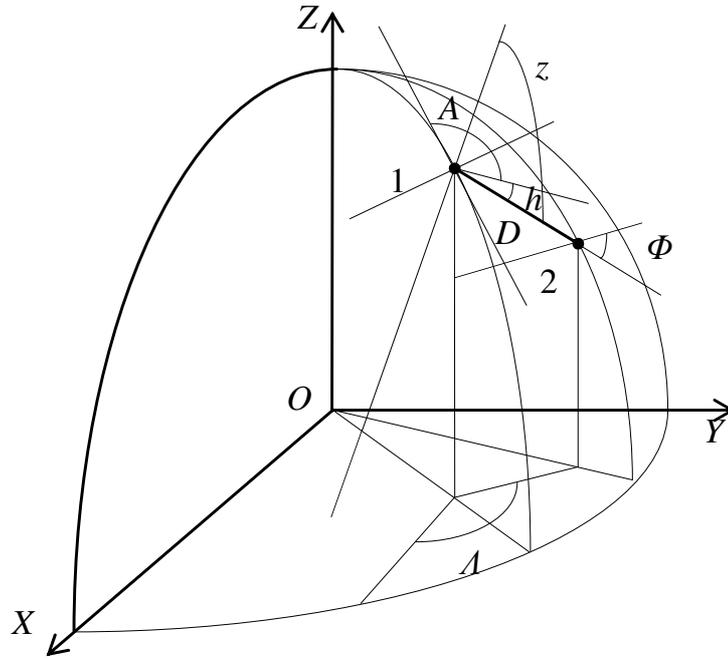


Рис. 7. Топоцентрическая система координат

Из рис. 7 очевидно:

$$\begin{aligned} A &= \tan^{-1} \frac{\Delta Y}{\Delta X} ; \\ \Phi &= \tan^{-1} \frac{\Delta Z}{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}} ; \end{aligned} \quad (8)$$

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} .$$

Обратный переход выполняется по формулам:

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} \cos \Phi \cos A \\ \cos \Phi \sin A \\ \sin \Phi \end{pmatrix} . \quad (9)$$

Если же за основную плоскость взять плоскость горизонта пункта 1, то сферические координаты будут определены углом h наклона линии 1 2 к плоскости горизонта (дополнением до 90° зенитного расстояния z) и азимутом A , отсчитанным в плоскости горизонта от направления на север до проекции линии 1 2. Переход от углов A и h к углам Λ и Φ осуществляется по формулам:

$$\tan \Lambda = \frac{\sin A}{\tan h \cos B + \sin B \cos A} ; \quad (10)$$

$$\sin \Phi = \sin B \sin h - \cos B \cos h \cos A ,$$

где B - широта пункта 2.

В топоцентрической горизонтальной системе, ось Z которой направлена по нормали к эллипсоиду, длина и направление хорды (азимут и зенитное расстояние) могут быть выражены через геодезические координаты пунктов - концов хорды [2]:

$$D_{12}^2 = (N + H)_1^2 + (N + H)_2^2 - 2(N + H)_1(N + H)_2 \cos \psi - \mu(N_2 \sin B_2 - N_1 \sin B_1)^2 - 2e^2(N_2 \sin B_2 - N_1 \sin B_1)(H_2 \sin B_2 - H_1 \sin B_1) ,$$

$$\cos \psi = \sin B_1 \sin B_2 + \cos B_1 \cos B_2 \cos(L_2 - L_1) ;$$

$$\mu = \frac{a^4 - b^4}{a^4} .$$

$$\cot A_{12} = \cot \alpha_{12} - e^2 \frac{(N_2 \sin B_2 - N_1 \sin B_1) \cos B_1}{(N + H)_2 \cos B_2 \sin(L_2 - L_1)}.$$

$$\cot A_{12} = \frac{\sin B_2 \cos B_1 - \cos B_2 \sin B_1 \cos(L_2 - L_1)}{\cos B_2 \sin(L_2 - L_1)};$$

$$\cos Z_{12} = \frac{1}{D_{12}} \left((N + H)_2 \cos \psi - (N + H)_1 - \right. \\ \left. - e^2 (N_2 \sin B_2 - N_1 \sin B_1) \sin B_1 \right).$$
(11)

Для значений азимута A_{21} и зенитного расстояния Z_{21} в пункте 2 в формулах (11) следует поменять индексы 1 и 2.

Связь азимута и зенитного расстояния хорды с экваториальными топоцентрическими координатами может быть представлена следующими выражениями [2]:

- для прямоугольных координат

$$\cot A_{12} = \frac{\Delta Z \cos B_1 - (\Delta X \cos L_1 + \Delta Y \sin L_1) \sin B_1}{\Delta Y \cos L_1 + \Delta X \sin L_1}$$

$$\cos Z_{12} = \frac{\cos B_1 \cos L_1 + \cos B_1 \sin L_1 + \sin B_1}{D_{12}}$$
(12)

- для полярных координат

$$\cot A_{12} = \frac{\sin \Phi_{12} \cos B_1 - (\cos A_{12} \cos L_1 + \sin A_{12} \sin L_1) \cos \Phi_{12} \sin B_1}{\cos \Phi_{12} (\cos A_{12} \cos L_1 + \sin A_{12} \sin L_1)}.$$

Обратное соотношение будет:

$$\begin{pmatrix} \cos \Phi \cos A \\ \cos \Phi \sin A \\ \sin \Phi \end{pmatrix}_{12} = \begin{pmatrix} \cos L_1 (\cos B_1 \cos Z_{12} - \sin B_1 \sin Z_{12} \cos A_{12}) - \sin L_1 \sin Z_{12} \sin A_{12}; \\ \sin L_1 (\cos B_1 \cos Z_{12} - \sin B_1 \sin Z_{12} \cos A_{12}) + \cos L_1 \sin Z_{12} \sin A_{12}; \\ \sin B_1 \cos Z_{12} + \cos B_1 \sin Z_{12} \cos A_{12} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Переход к общеземной системе координат

Построение космических геодезических сетей позволяет установить и контролировать единую общеземную систему координат, начало которой определяется центром масс Земли, а ориентация осей - принятыми системами единого времени и полюса. Масштаб единой сети задается принятым значением скорости света с посредством линейных измерений. Следует отметить, что последнее определение значения скорости света в вакууме выполнено с относительной ошибкой 10^{-9} , реальная скорость электромагнитных волн с учетом факторов, влияющих на скорость распространения сигнала может быть определена с относительной ошибкой 10^{-7} . Вопрос о приведении всех геодезических систем в единую общеземную с началом координат в центре масс Земли до недавнего времени рассматривался более в теоретической, чем в практической постановке. Это объясняется трудностями выполнения на земной поверхности (особенно поверхности океана) необходимых достаточно точных и обширных гравиметрических и геодезических измерений. Геодезическое использование спутников в сочетании с методами гравиметрии позволяет уже в настоящее время определить общую земную систему координат. Все системы координат X_i , в которых построены региональные геодезические сети, могут быть

переведены в единую геодезическую систему координат X путем переноса начала региональной системы координат на вектор:

$$\overline{\Delta X} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T \quad (14)$$

и поворота координатных осей, задаваемого матрицей:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -\omega_x & \omega_y \\ \omega_x & 1 & -\omega_z \\ -\omega_y & \omega_z & 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Масштабное преобразование представляет собой линейное изменение региональной сети по отношению к общеземной системе на некоторый коэффициент χ . Таким образом, общее преобразование координат пунктов из региональных геодезических систем в общеземную определяется выражением:

$$\overline{X} = \overline{X}_i + \overline{\Delta X} + \chi R \overline{X}_i. \quad (16)$$

Если для каждой геодезической системы установлено преобразование такого рода, то по разностям параметров преобразований можно определить взаимное смещение их начал и тем самым полностью решить задачу о связи геодезических систем координат. Координаты центров основных референц-эллипсоидов приведены в таблице 7 [2].

Таблица 7

Геодезическая система, референц-эллипсоид	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
Европейская, Хейфорда	-83	-111	-126
Токийская, Бесселя	-143	+514	+675
Австралийская, Австралийский	-123	-43	+137
Индийская, Эвереста	+293	+699	+229
Африканская, Кларка 1880	-128	-146	-348
NAD 27 Североамериканская, Кларка 1866	-21	+158	+176
Южноамериканская, Хейфорда	-78	+2	-43
СК-42, Красовского	+24	-127	-78

В некоторых случаях, учитывая малость возможных углов разворотов геодезических систем, ими можно пренебрегать, за исключением отдельных специально оговоренных случаев.

Система координат в плоскости геодезической проекции.

Для решения многочисленных задач отраслей экономики, обороны и безопасности страны, ведения землеустроительной, градостроительной и кадастровой деятельности более удобны плоские прямоугольные координаты.

Плоские геодезические прямоугольные координаты x, y строятся в равноугольных проекциях, называемых геодезическими. Основными требованиями к таким проекциям будут:

- конформность (равноугольность);
- малые искажения в пределах выделенной зоны (листа топографической карты);
- возможность учета искажений в границах зон значительных размеров;
- минимальное количество зон для покрытия территории;
- единообразие зон;

- возможность распространения системы плоских координат на весь мир.

Число таких равноугольных проекций невелико - азимутальная проекция Руссиля, коническая проекция Ламберта и поперечно-цилиндрические проекции Гаусса-Крюгера и универсальная поперечная Меркатора UTM (Universal Transverse Mercator). Число зон в азимутальных и конических проекциях сравнительно велико и они не обладают единообразием. Наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют получившие глобальное распространение поперечно-цилиндрические проекции.

Первым государством, применившим с 1917 года координаты Гаусса-Крюгера, была Австрия [92]. Вопрос о введении единой системы прямоугольных координат для территории СССР обсуждался в 20-30-х годах XX века. В 1928 г. эта проекция была введена. Вначале ее использовали только для топографических карт масштабов крупнее 1:500 000. С 1939 г. ее стали применять и для карт масштаба 1:500 000. В 80-х годах она была распространена на весь масштабный ряд топографических карт, включая все карты масштаба 1:1 000 000. Конформная геодезическая проекция Гаусса-Крюгера используется в России и ряде государств-участников СНГ. Прежде всего, выбор конформной (равноугольной) проекции позволяет вести геодезические вычисления по более простым формулам плоской тригонометрии, а не сфероидической геодезии. По причине большого количества разных координатных зон отпадают все азимутальные проекции, в т. ч. стереографическая.

Что касается других проекций, коническая проекция Ламберта не требует разложений в ряды при переходе со сфероида на плоскость, но в ней для территории СССР необходимо было установить 96 координатных зон $4^\circ \times 10^\circ$ против 20 однообразных шестиградусных зон в цилиндрической проекции Гаусса-Крюгера. Далее, при одинаковой трудности вычисления прямоугольных координат, их приращений и сближения меридианов, координаты Зольднера имеют в два раза меньшее искажение площадей, однако преимущество перед ними координат Гаусса-Крюгера состоит в более простом учёте искажений длин и направлений, а также нахождения длины и дирекционного угла по плоским координатам конечных точек [24]. То, что требованиям геодезии в наибольшей степени соответствует именно проекция Гаусса-Крюгера отмечал ещё болгарский академик В. К. Христов [92]. Теория этой проекции достаточно детально разработана, включена во все существующие учебные и справочные пособия по картографии и сфероидической геодезии, а также входит в программы обучения по геодезическим специальностям.

В России применяют шестиградусные зоны с осевыми меридианами 3° , 9° , 15° и т.д. Предусмотрены перекрытия смежных зон на востоке и западе; при этом до широты 28° перекрытия составляют 1° , в широтах 28° - 76° - 2° и в широтах более 76° - 3° [43]. Можно считать, что на всей территории СССР были установлены не 6° , а 10° зоны, так как на стыке 6° зон была установлена полоса перекрытия в 2° к востоку и 2° к западу [17].

Трёхградусные зоны применяют при создании крупномасштабных топографических планов при съёмках городов, территорий под строительство крупных инженерных сооружений, создании местных систем координат.

Проекция Гаусса-Крюгера является геодезической: осевой меридиан изображается прямой линией, вдоль которой масштаб изображения постоянен и равен единице; масштаб изображения постоянен в точке и зависит только от координат точки (конформность). В основе топографических карт и планов России встречаются эллипсоиды, параметры которых указаны в табл. 8.

Таблица 8

Система координат	Эллипсоид	Большая полуось a , м	Сжатие α
СК-32	Бесселя	6 377 397	1:299,15
СК-42, СК-63, СК-95, МСК	Красовского	6 378 245	1:298,3
ГСК-2011	ГСК-2011 (ЦНИИГАиК)	6 378 136,5	1:298,2564151

Преобразование геодезических координат B, L в плоские прямоугольные x, y и обратно обычно осуществляется с помощью разложения в ряд по малому параметру:

- при расчёте прямоугольных координат (прямая задача) таким параметром служит удаление от осевого меридиана l ;

- при преобразовании плоских прямоугольных координат в геодезические (обратная задача) - это ордината y .

В качестве главного, начального, приближения для абсциссы x выступает длина X дуги меридиана от экватора до точки с широтой B , а в обратной задаче - широта B_x , найденная по абсциссе x .

Для эллипсоида Красовского формулы преобразования геодезических координат B, L в плоские прямоугольные x, y и обратно приведены в многочисленной научной, учебной, справочной и нормативной литературе. По координатам Гаусса-Крюгера имеется обстоятельная монография В. К. Христова «Координаты Гаусса-Крюгера на эллипсоиде вращения» [92], учебник В. П. Морозова «Курс сфероидической геодезии» [17], работа А. П. Герасимова «Уравнивание государственной геодезической сети» [41], фундаментальная работа «Геодезическая система координат 2011 года» [24], межгосударственный стандарт ГОСТ 32453-2017 «Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек» [7].

Более подробно вопросы преобразования координат Гаусса-Крюгера в ГСК-2011 будут рассмотрены в следующих разделах курса.

3 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.

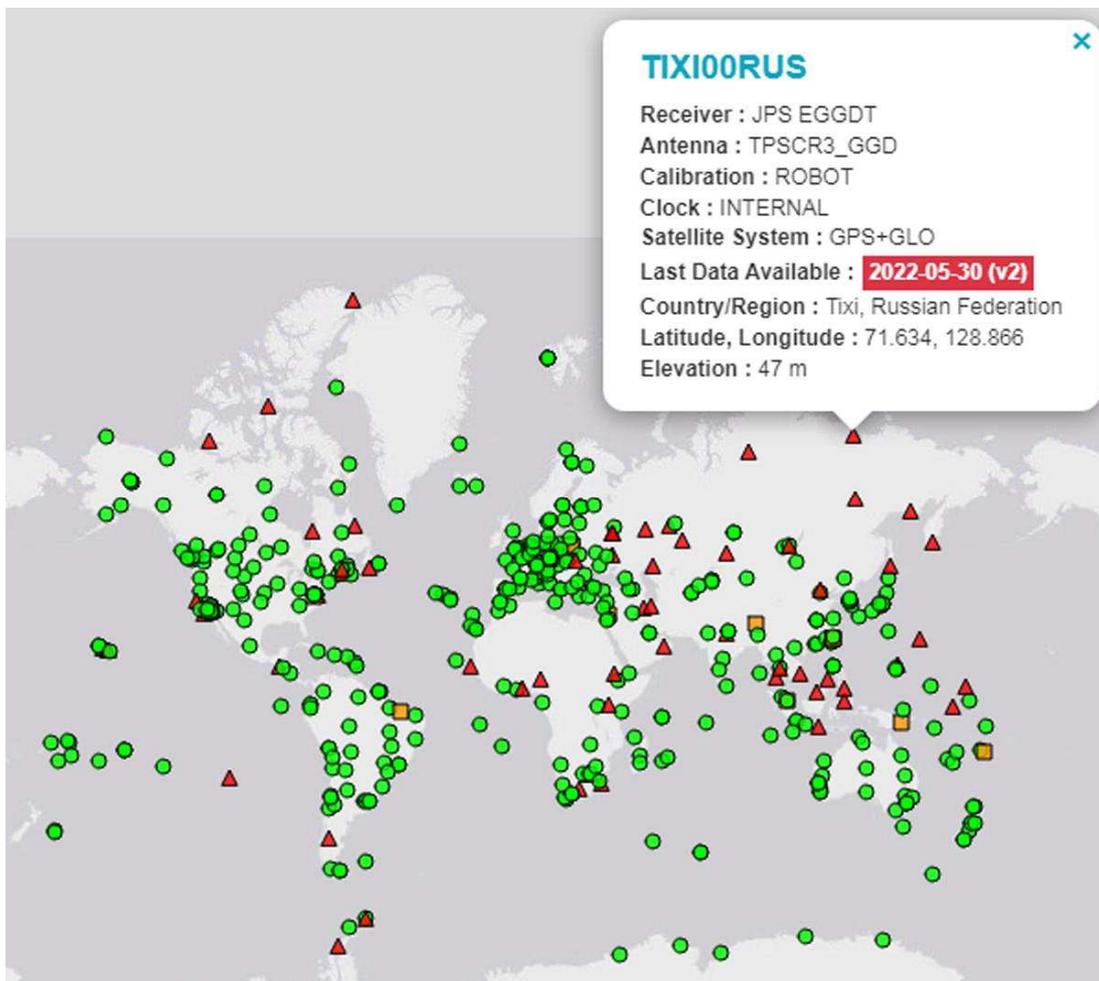


Рис. 8. Схема расположения пунктов IGS.

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. Пеллиненна, 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.

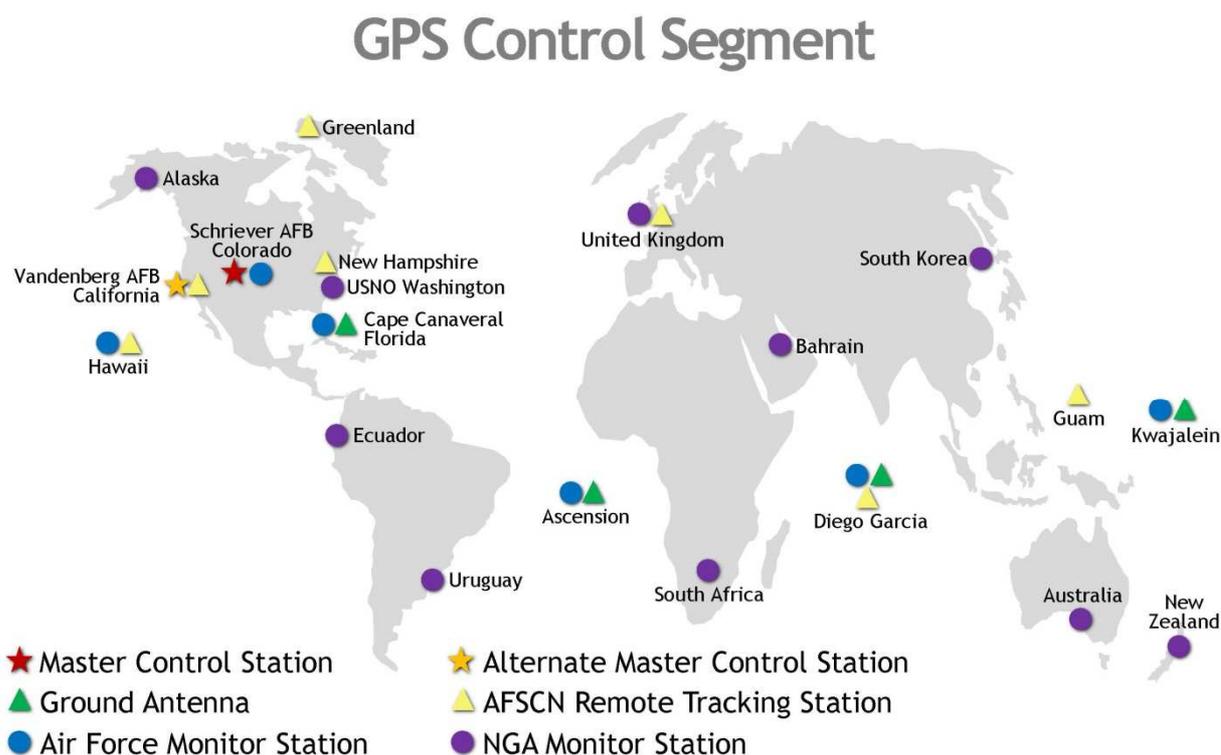


Рис. 9. Схема расположения объектов Контрольного сегмента GPS [95].

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].

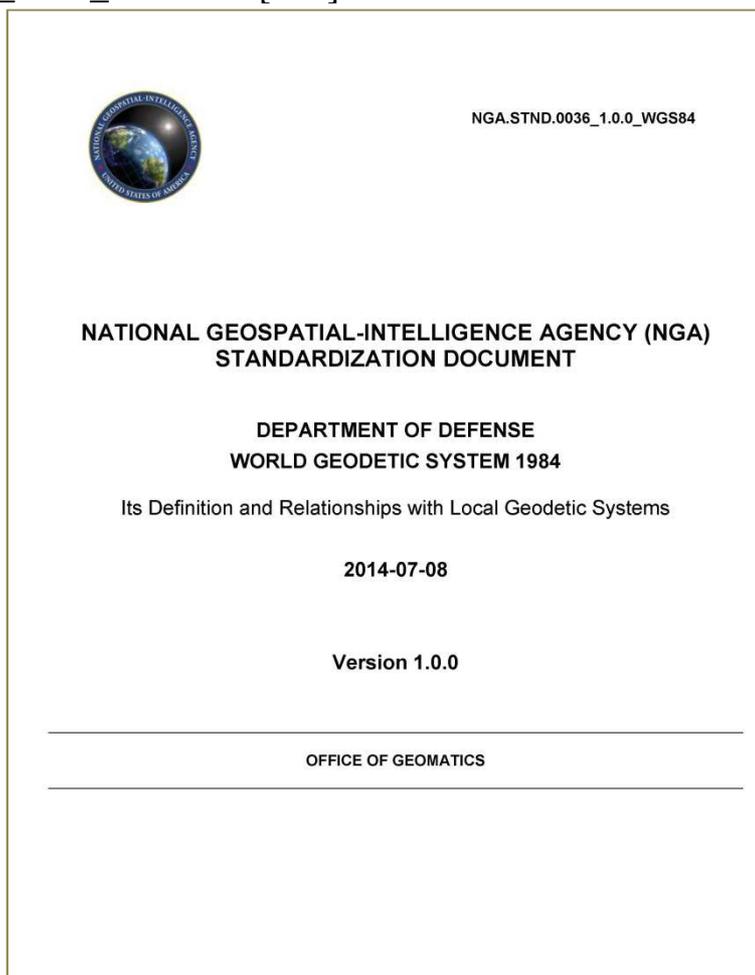


Рис. 10. Документ по стандартизации Национального агентства геопространственной разведки Министерства обороны США. Общеземная система координат (геодезическая система) 1984 года. Определение и связь с локальными системами координат (геодезическими системами). 2014-07-08. Версия 1.0.0. NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84

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.

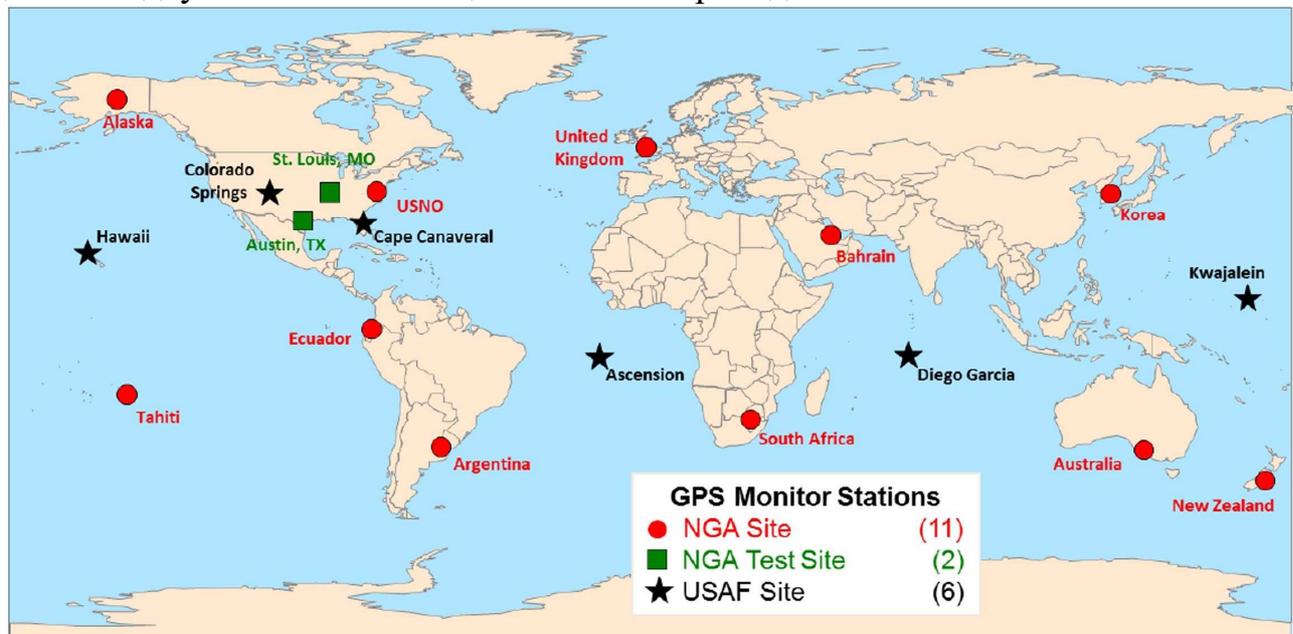


Рис. 11. Схема расположения станций мониторинга WGS 84 (G1762) [105].

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

4 Континентальные и национальные системы координат

Геодезическая система координат является главной составной частью системы геодезического обеспечения. Понятие «Система геодезического обеспечения» эволюционировало с развитием геодезии, как и любого направления научной и практической человеческой деятельности, под влиянием двух основных факторов: востребованностью в обществе на данном этапе развития экономики с одной стороны и уровнем развития технических средств и технологий для реализации этой деятельности с другой. Эволюция понятия «Система геодезического обеспечения» от определения «производственный процесс, заключающийся в создании геодезических информационных ресурсов для проведения специальных геодезических работ» в Стандарте отрасли «Виды и процессы геодезической и картографической производственной деятельности. Термины и определения» [3] до современного понимания - совокупность правовых, организационных, научно-технических и производственных мероприятий, основной целью которых является выполнение требований экономики, науки, обороны и безопасности к точности и оперативности определения местоположения точек на поверхности Земли; а так же в подповерхностном слое Земли, приповерхностном слое атмосферы Земли и околоземном пространстве в единой системе координат, высот и параметров внешнего гравитационного поля Земли. В соответствии с этими требованиями строятся структура и порядок функционирования системы, определяется состав технических средств и методов. Естественно, что по мере развития технических средств, геодезической науки и изменений требований к точности и оперативности координатных определений должна претерпевать изменения и сама структура системы геодезического обеспечения [50, 51, 52, 83, 84]. Общая предварительная структура сетевой информационно-технологической системы геодезического обеспечения Российской Федерации была опубликована в 2016 г. в журнале «Геопрофи» [71], в 2017 г. в материалах форума «Великие реки» [44] и

в материалах XIX Национальной научной конференции с международным участием «Модернизация России: приоритеты, проблемы, решения» [64]. В системе геодезического обеспечения принято выделять три вида и четыре уровня обеспечения [44, 64, 67, 68]. Виды обеспечения:

- координатное (система геодезических координат);
- высотное (система нормальных высот);
- гравиметрическое (система гравиметрических измерений).

Уровни обеспечения:

- установление систем координат, высот, гравиметрических измерений;
- распространение установленных систем координат, высот, гравиметрических измерений на заданную территорию;
- контроль стабильности установленных систем координат, высот, гравиметрических измерений в пределах заданной территории;
- предоставление потребителям возможности определения местоположения в установленных системах координат, высот и гравиметрических измерений.

Общая структура сетевой информационно-технологической системы геодезического обеспечения представлена на рис. 15 [44, 64, 67, 68].

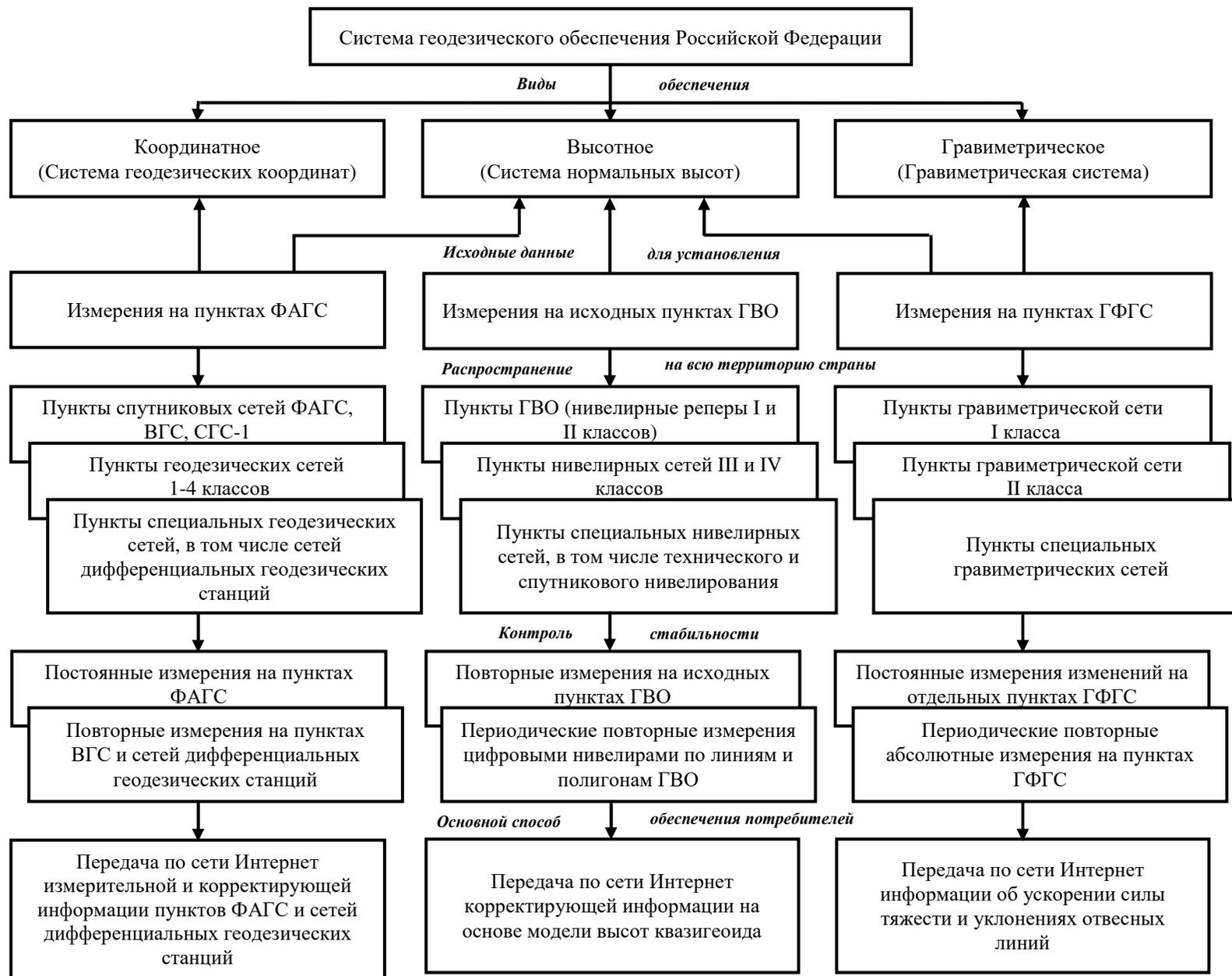


Рис. 15. Общая структура сетевой информационно-технологической системы геодезического обеспечения Российской Федерации

Континентальные системы координат

В 1987 году решением Генеральной Ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза - МГТС (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) была создана подкомиссия SC1.3 Международной ассоциации геодезии IAG по региональным опорным сетям. SC1.3 включает 6 региональных подкомиссий ответственных за соответствующие региональные блоки, а именно: региональная подкомиссия по Европе (SC1.3a Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe) - EUREF, региональная подкомиссия по Южной и Центральной Америке (SC1.3b South and Central America) - SIGRAS (Sistema de Referencia Geocentrico para Las Americas - исп.), региональная подкомиссия по Северной Америке (SC1.3c North America) - NAREF, региональная подкомиссия по Африке (SC1.3d Africa) - AFREF, региональная подкомиссия по Азиатско-Тихоокеанскому региону (SC1.3e Asia-Pacific), региональная подкомиссия по Антарктике (SC1.3f Antarctica) - SCAR (Scientific Committee on Antarctic Research) [114].

Наиболее авторитетной и продолжительно функционирующей из 6 региональных подкомиссий SC1.3 Международной ассоциации геодезии IAG является Региональная подкомиссия по Европе - EUREF (SC1.3a Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe), включающая не только постоянно действующий аппарат, но и Правление EUREF (EUREF Governing Board - EUREF-GB), бывшая техническая рабочая группа (EUREF Technical Working Group - TWG). В Резолюции 1, принятой EUREF в 1990 году, рекомендовано использовать Европейскую систему (European Terrestrial Reference System (ETRS89)), совпадающую с Международной системой ITRS в эпоху 1989.0 и связанную со стабильной частью Евразийской платформы. Техническая рабочая группа EUREF (TWG) не рекомендовала использовать ETRF2005, а ограничиться реализацией ETRF2000. Однако, для использования реализаций ITRF2005 и ITRF2008, техническая рабочая группа также рекомендовала, чтобы все Европейские станции (GNSS, РСДБ, лазерная локация ИСЗ и ДОРИС), которые включены в ITRF публиковали координаты и скорости в реализациях ETRF2000 со следующими обозначениями ETRF2000(R05) и ETRF2000(R08) [94].

После выхода ITRF2014, резолюция EUREF № 1 2017 года отмечая улучшенную точность и стабильность исходных и масштабных параметров ITRF2014 и важность улучшения реализации ETRS89 на основе ITRF2014, призвала предоставить все определяющие параметры ETRF2014, происхождение которых совпадает с исходным и предоставить полный набор параметров преобразования между версиями ITRF и ETRF в обновленной технической записке. В той же резолюции также признаются различные требования, касающиеся национальных реализаций ETRS89, и решения разных стран о принятии их предпочтительных реализаций ETRS89, включая рекомендуемый ETRF2000 [94].

В настоящее время координаты и скорости Европейских станций ITRF (GNSS, VLBI, SLR и DORIS) преобразованы в соответствующие реализации ETRF (ETRF89, ETRF90, ETRF91, ETRF92, ETRF93, ETRF94, ETRF96, ETRF97,

ETRF2000, ETRF2005, ETRF2014), которые опубликованы на официальном сайте [94].

Европейская система ETRS не распространяется на значительную часть континента на территории Российской Федерации и Республики Беларусь, а ее практическая реализация ETRF не включает пункты спутниковых сетей этих государств.

Фактически из подкомиссий SC1.3 Международной ассоциации геодезии IAG по региональным опорным сетям понятию континентальной системы координат строго соответствует только региональный блок по Антарктиде и его региональная подкомиссия SC1.3f Antarctica

Австралия, несмотря на самую высокую скорость континентального дрейфа не удостоилась отдельного блока и вошла в региональную подкомиссию по Азиатско-Тихоокеанскому региону SC1.3e Asia-Pacific.

Геоцентрическая система координат Австралии (Geocentric Datum of Australia) GDA94 по сути является не только национальной системой координат, но и континентальной, поскольку из-за тектонических движений Австралийской плиты (примерно 70 мм в год в направлении северо-северо-восток) координаты пунктов на всем континенте существенно расходятся с общеземными системами координат.

Блока и соответствующей инфраструктуры ITRF по Восточной Европе, Северной и Средней Азии, покрывающих большую часть территории СНГ, нет. Нет также блока ITRF и по части Южной Азии, относящейся к Китаю.

Секция геодезии Национального геофизического комитета Российской Федерации регулярно представляет Международной ассоциации геодезии IAG Национальные доклады об основных результатах исследований, проводимых российскими геодезистами по темам, соответствующим направлениям деятельности Международной ассоциации геодезии [106, 107, 108]. Одним из основных разделов таких отчетов на протяжении ряда лет является Reference frames [111, 112, 113].

В 2011-2014 гг. ЦНИИГАиК совместно с Секцией геодезии Национального геофизического комитета подготовил предложения по созданию в составе подкомиссии SC1.3 Международной ассоциации геодезии IAG по региональным опорным сетям новой подкомиссии по региональной земной геодезической системе координат (основе) Северо-Восточной Евразии [21, 49, 69, 109, 110].

В результате проведенной работы были разработаны проект Соглашения об участии в подкомиссии Международной ассоциации геодезии по региональной земной опорной системе координат Евразии (SC 1.3 g Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe-Asia - EAREF) и проект Положения о EAREF.

Проектом Положения было декларировано, что Подкомиссия Международной ассоциации геодезии по региональной земной опорной системе координат Евразии (SC 1.3 g Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe-Asia - EAREF) является добровольным объединением организаций различной формы собственности и различной организационно-правовой

формы, распоряжающихся принадлежащими им на праве собственности или на ином законном основании геодезических пунктов и центров обработки, пригодных для создания и развития региональной земной опорной системы координат Евразии EATRF (European-Asian Terrestrial Reference Frame). Подкомиссия координирует научное сотрудничество между участниками подкомиссии в области создания и развития региональной земной опорной системы координат Евразии EATRF (European-Asian Terrestrial Reference Frame). Способствует развитию единых координатной, высотной и гравиметрической систем в Восточной Европе, Северной и Средней Азии, соответствующих территории Союзного государства (Россия, Белоруссия), Единого экономического пространства (Россия, Белоруссия, Казахстан), Союза Независимых Государств – СНГ, других государств Евразии.

Проектом Положения были определены задачи, предварительная структура, права подкомиссии EAREF, а также определение геодезических пунктов, которые могут участвовать в создании и развитии региональной земной опорной системы координат Евразии (пунктов EATRF).

Соглашением предусматривалось осуществлять:

- научное сотрудничество в рамках международной научной общественной организации Международная ассоциация геодезии (International Association of Geodesy - IAG) под эгидой Секции геодезии Национального геофизического комитета при Российской академии наук с целью создания и развития региональной земной опорной системы координат Евразии EATRF (European-Asian Terrestrial Reference Frame);

- геодезические и геофизические наблюдения, сбор, хранение и распространение измерительной информации, ее обработку (первичную и окончательную) в соответствии с едиными согласованными рекомендациями подкомиссии Международной ассоциации геодезии по региональной земной опорной системе координат Евразии (SC 1.3 g Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe-Asia - EAREF);

- открытый взаимный обмен данными наблюдений и результатами обработки с использованием телекоммуникационных средств на основе единого регламента, а также передачу результатов обработки наблюдений в техническую рабочую группу региональной земной опорной системы координат Евразии EAREF TWG (EAREF Technical Working Group) и аналитические центры, обеспечивающие выработку согласованных решений (объединенных координатных решений, временных рядов изменений координат, моделей ионосферы, тропосферных задержек и других результатов).

Завершить проделанную работу помешали реорганизация ЦНИИГАиК и безвременная кончина ведущего идеолога этой работы Г. В. Демьянова. В настоящее время работа по созданию новой подкомиссии по региональной земной геодезической системе координат (основе) Северо-Восточной Евразии (SC 1.3 g Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe-Asia - EAREF) продолжается.

Национальные системы координат

Помимо участия в создании и поддержании глобальных (общеземных) систем координат, высокоразвитые страны с большой территорией одновременно создают национальные спутниковые геодезические сети, реализующие национальные системы координат.

Современные национальные системы координат, с одной стороны, являются геоцентрическими, максимально приближенными к международной системе ITRS и ее практической реализации ITRF. С другой стороны, национальные системы координат оптимальным образом ориентированы на реализацию государственного геодезического и картографического потенциала, уже созданного к этому времени. Характерными примерами национальных систем координат являются системы координат США (National Spatial Reference System - NSRS), Канады (Canadian Spatial Reference System - CSRS), Австралии (Geocentric Datum of Australia - GDA), Китая (China Geodetic Coordinate System 2000 - CGCS 2000) и России (Геодезическая система координат 2011 года – ГСК-2011). Учитывая значительный территориальный охват таких систем координат, их практические реализации достаточно близки к глобальным (общеземным) системам. На рис. 16 показаны зоны действия таких систем координат [5, 21].



Рис. 16. Национальные геодезические системы координат [5, 21].

Национальная система координат США - NSRS

В США независимо от работ по поддержанию и развитию системы координат WGS-84, участия в работах по развитию и поддержанию международной земной системы координат ITRF и участия в работе

Международного сервиса ГНСС (International GNSS Service - IGS), в рамках десятилетнего плана Национальной геодезической съемки NGS (National Geodetic Survey) на 2008-2018 годы развивалась национальная пространственная система координат NSRS (National Spatial Reference System), оптимальным образом ориентированная на эффективное использование уже созданного в США геодезического и картографического потенциала.

NSRS базируется на Национальной спутниковой сети США, представляющей собой совокупность пунктов федеральной опорной сети (Federal Base Network — FBN), объединенной опорной сети (Cooperative Base Network — CBN) и пользовательской сети сгущения (User Densification Network — UDN).

Федеральная опорная сеть FBN представлена сетью постоянно действующих фундаментальных станций, расположенных через 100 км. Сеть обеспечивает пространственный контроль с наиболее высокой на сегодняшний день точностью (95%): 1 см для широт и долгот, 2 см для эллипсоидальной (геодезической) высоты, 3 см для ортометрической высоты, 50 мГал для силы тяжести, 1 мм/год для движения земной поверхности.

Объединенная опорная сеть CBN объединяет постоянно действующие станции, расположенные на территории Соединенных Штатов на расстоянии 25–50 км одна от другой. Национальная геодезическая служба США (National Geodetic Survey — NGS) отвечает за CBN и оказывает помощь и консультации сотрудничающим учреждениям в осуществлении пространственного контроля в соответствии с принятыми федеральными стандартами и техническими условиями.

Пользовательская сеть сгущения UDN обеспечивает пространственную привязку локальных инфраструктурных проектов, а при необходимости — и контроль качества, архивирование и распространение данных пунктов UDN. Перед отправкой данных в NGS, организация — владелец пунктов UDN должна проверить их точность, используя программное обеспечение, поставляемое NGS.

Соединенные Штаты в рамках модернизации координатной основы планировали введение новой североамериканской земной системой отсчета (NATRF2022). NATRF2022 первоначально планировалось развернуть в 2022 году, однако Национальная геодезическая служба США недавно объявила о задержке примерно до 2024 или 2025 года [21].

Национальная система координат Канады - CSRS

На аналогичных принципах формируется национальная геоцентрическая (пространственная) система координат в Канаде Canadian Spatial Reference System (CSRS) [21].

Национальная система координат Австралии - GDA

Геоцентрическая система координат Австралии GDA (Geocentric Datum of Australia) - система координат, принятая Межправительственным комитетом по геодезии и картографии Австралии ICSM (Intergovernmental Committee on

Surveying and Mapping). GDA94 являлась статической системой координат на основе Международной земной системы координат ITRF 1992 года (ITRF92) на эпоху 1 января 1994 года. В это время GDA94 и ITRF совпадали с WGS84. Однако, с течением времени, реализации ITRF и WGS84 расходятся с GDA94, в первую очередь, вследствие тектонических движений Австралийской плиты (примерно 70 мм в год в направлении северо-северо-восток). К 2020 году разница составила примерно 1,8 метра. GDA2020 основана на реализации ITRF2014 в эпоху 2020.0, или 1 января 2020 года [21].

Национальная система координат Китая - CGCS

Основу китайской геодезической системы координат CGCS 2000 (China Geodetic Coordinate System 2000) составляет спутниковая геодезическая сеть трех уровней:

- сеть 28 постоянно действующих станций с точностью взаимного положения 3 мм;
- национальная контрольная GPS сеть (National GPS control network 2000 — GPS 2000), включающая 2 500 пунктов с точностью взаимного положения 3 см;
- астрономо-геодезическая сеть, включающая около 50 000 пунктов со средними расстояниями между ними около 22 км уравненная совместно с GPS 2000. На рис. 17. Представлена схема расположения постоянно действующих станций CGCS 2000 [21].

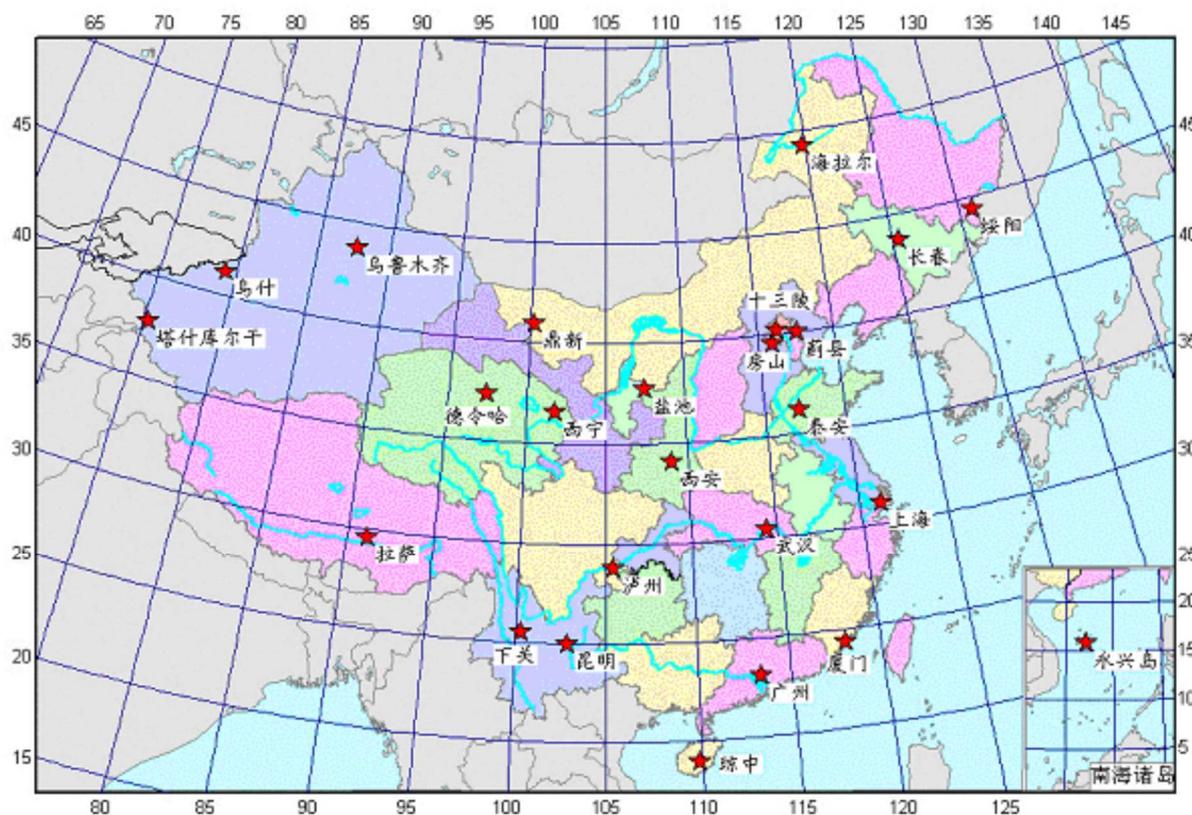


Рис. 17. Схема расположения постоянно действующих станций CGCS 2000

Разработка и создание геодезической системы координат 2011 года (ГСК-2011) является логическим шагом в развитии геодезического обеспечения в России. История создания государственной геодезической спутниковой сети и государственной геодезической системы координат ГСК-2011 достаточно подробно рассмотрена в геодезической литературе [5, 21, 46, 67].

Государственная геодезическая система координат Российской Федерации ГСК-2011 представляет собой геоцентрическую систему координат. По принципам ориентировки в теле Земли ГСК-2011 идентична Международной земной опорной системе координат ITRS, установленной в соответствии с рекомендациями Международной службы вращения Земли и систем координат МСВЗ (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS).

Основу системы координат ГСК-2011 составила государственная спутниковая фундаментальная автронимо-геодезическая сеть (ФАГС), использованная при выводе параметров этой системы. Общий состав пунктов, включенных в уравнивание ФАГС, характеризуется следующими данными:

- общее число пунктов, включенных в уравнивание 46, в том числе:
 - российских 38;
 - зарубежных 8;
- число опорных пунктов 21, в том числе:
 - российских 13;
 - зарубежных 8.

Исходные данные для уравнивания включали в себя:

- файлы суточных спутниковых наблюдений на пунктах ФАГС на интервале 2 лет (2010–2011 гг.);
- файлы координат спутников;
- файлы моделированных ионосферных задержек;
- файл сведений о сбоях в работе аппаратуры спутников GPS/ГЛОНАСС;
- параметры вращения Земли.

Обработка суточных сеансов измерений выполнена с помощью программного комплекса BERNESE 5.0. Использовалась традиционная схема вычислений по двойным разностям фазовых измерений, включающая следующие основные этапы вычислений:

1. численное интегрирование движений ИСЗ GPS/ГЛОНАСС для вычисления их координат на моменты наблюдений;
2. преобразование и предварительный контроль данных наблюдений;
3. преобразование исходных координат станций на эпоху сеанса наблюдений;
4. вычисление поправок часов приемников по кодовым измерениям;
5. образование одинарных разностей фазовых измерений, предварительный контроль и отбраковка грубых значений;
6. разрешение фазовых неоднозначностей (вычисления по отдельным базовым линиям);
7. совместное уравнивание всей сети, как «свободной»;

8. вычисление параметров трансформирования Гельмерта между вычисленными координатами опорных пунктов и их приведенными на эпоху наблюдений значениями;

9. контроль отклонений вычисленных координат опорных пунктов и в случае грубых результатов — исключение пункта из числа опорных и выполнение нового уравнивания сети;

10. преобразование всех вычисленных координат «свободной» сети с помощью найденных параметров Гельмерта и оценка точности.

Используемые на этапе 3 начальные значения координат пунктов выбирались из таблиц их значений на эпоху 2011.0 и скоростей смещений. Для пунктов IGS координаты выбирались из международного каталога, а для других пунктов использовались априорные значения координат и значения скоростей, вычисленные по геодинамической модели NUVELL.

Механизм привязки сети ФАГС к «каркасной» сети опорных пунктов IGS (этапы 8–10) основан на широко используемом IERS методе «мягкого согласования». Согласно этому методу, при уравнивании суточных сеансов измерений на первом этапе сеть рассматривается как «свободная», т.е. координаты опорных пунктов не фиксируются жестко, а вычисляются вместе с координатами других пунктов. На втором этапе осуществляется трансформирование (по Гельмерту) вычисленной «свободной» сети под условием минимума суммы квадратов отклонений полученных координат опорных пунктов от их принятых значений.

Средние квадратические погрешности уравненных координат пунктов ФАГС составили 0,1–1,0 см в плане (пункт ФАГС «Владивосток» - 1,9 см) и 0,2–1,5 см по высоте (пункт ФАГС «Владивосток» — 2,14 см) [68].

Геодезическая система координат ГСК-2011 была установлена в 2012 г. Постановлением Правительства Российской Федерации. После принятия в 2015 году нового Федерального закона «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» эта система координат была без изменений вновь установлена Постановлением Правительства Российской Федерации в 2016 г. [26].

Основные параметры системы координат ГСК-2011, ее физические и геометрические характеристики определены приказом Росреестра «Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года» [39].

Справочные материалы по ГСК-2011 и смежным вопросам представлены в последнем разделе научно-технического сборника «Астрономия, Геодезия и геофизика» [24]. При этом авторы, не вдаваясь в подробности привязки пунктов ФАГС к «каркасной» сети опорных пунктов IGS, утверждают, что пункты IGS использовались в качестве исходных.

По состоянию на 1 января 2015 года государственная геодезическая спутниковая сеть насчитывала 4 624 пункта. ФАГС состояла из 54 пунктов, из которых 45 постояннодействующие и 9 периодически определяемые. В состав пунктов ФАГС входили 13 пунктов РАН, 5 пунктов Росстандарта и 36 пунктов

Росреестра, 3 пункта совмещены с пунктами РСБД, 8 пунктов совмещены с пунктами Системы дифференциальной коррекции и мониторинга СДКМ Роскосмоса. ВГС состояла из 326 пунктов, а СГС-1 насчитывала 4 244 пункта.

По состоянию на 1.01.2019 государственная геодезическая спутниковая сеть Российской Федерации включала 67 пунктов ФАГС, 363 пункта ВГС и более 5 000 пунктов СГС-1.



Рис. 18. Схема расположения пунктов действующих и создаваемых пунктов ФАГС по состоянию на 1.01.2023 [108]

В таблице 11 представлено развитие пунктов ФАГС в Арктике.

Таблица 11

До 2021года	В 2021-2022 гг.
Баренцбург	Мыс Шмидта
Мурманск	Лаврентия
Ловозеро	Черский
Нарьян-Мар	Депутатский
Амдерма	Юрюнг-Хая
Салехард	Удачный
Диксон	Новый Уренгой
Тикси	Туруханск
Анадырь	Сабетта
Архангельск	Болушья Губа
Ноябрьск	Остров Хейса
Усть-Нера	Янискоски

	Несь
	Медвежьегорск
	Сургут

На рис. 19 приведен внешний вид пункта ФАГС «Баренцбург» на острове Шпицберген [107], а на рис. 20 - внешний вид пункта ФАГС «Остров Хейса» на архипелаге Земля Франца-Иосифа [108].



Рис. 19. Внешний вид пункта ФАГС «Баренцбург» на острове Шпицберген [107]



Рис. 20. Внешний вид пункта ФАГС «Остров Хейса» на архипелаге Земля Франца-Иосифа [108]

Сведения о месте нахождения пунктов ФАГС и их координаты в местных системах координат представлены на сайте ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» в разделе «Центр точных эфемерид». Приведены описания и схемы местоположения пунктов ФАГС с указанием прямоугольных и геодезических координат и скоростей их изменения, тип спутниковых приемников и антенн, а также общая карта размещения пунктов ФАГС [32]. На рис. 21 приведен фрагмент карты.

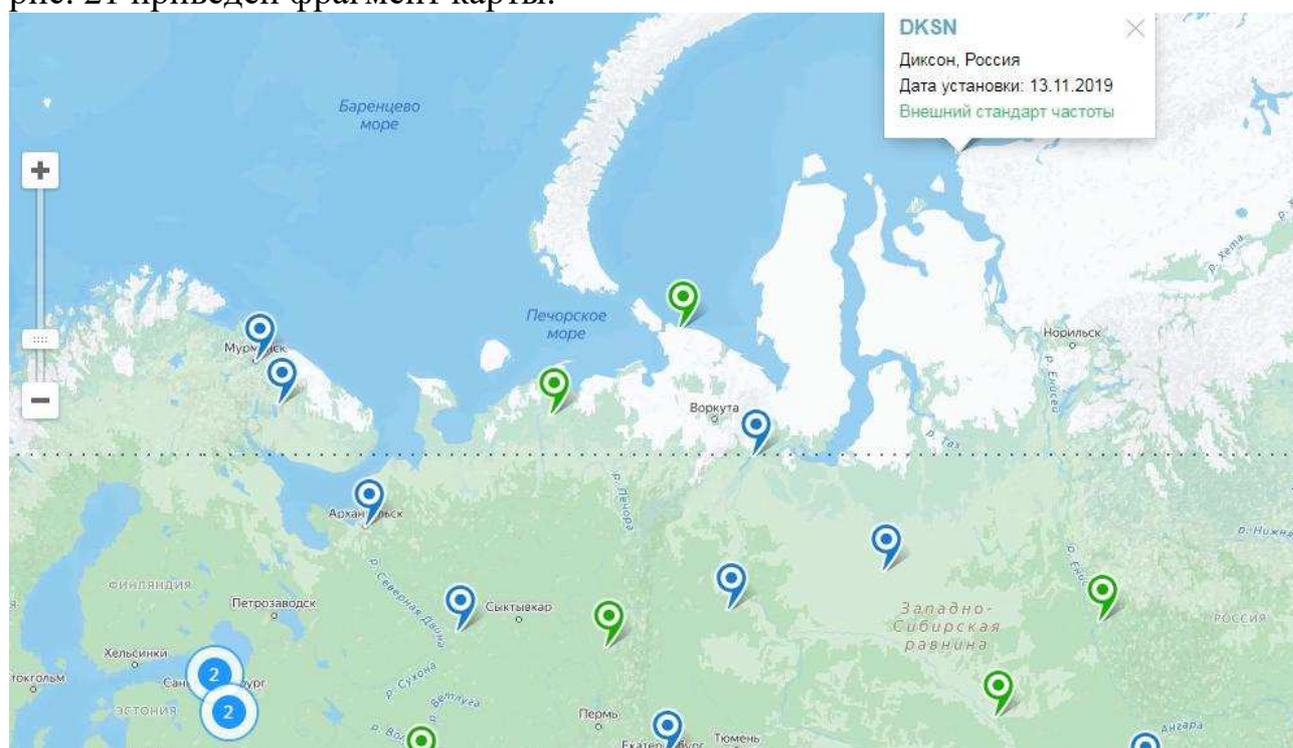


Рис. 21. Фрагмент карты размещения пунктов ФАГС [32]

Пункты являются стационарными астрономо-геодезическими обсерваториями, оборудованными комплексом прецизионной аппаратуры: стандартами частоты, метеорологическими датчиками, аппаратурой слежения за локальными деформациями земной поверхности в районе расположения обсерватории и стабильностью положения сооружения, на котором размещаются антенны, и т.д. Все пункты фундаментально закреплены с обеспечением долговременной стабильности их положения как в плане, так и по высоте. Технические требования к пунктам ФАГС определены национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 53374-2016 [ГОСТ Р 53374-2016].

Список координат и скоростей пунктов участвовавших в первичном построении системы координат ГСК-2011 на эпоху 1 января 2011 г. представлены на сайте ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» в разделе «Государственная геоцентрическая система координат Российской Федерации ГСК-2011» [32].

Таким образом, большинство высокоразвитых стран, имеющих значительные территории, принимая активное участие в международных проектах и программах по созданию единой общеземной геоцентрической системы координат, одновременно создают национальные (государственные) системы координат, оптимальным образом ориентированные на сохранение и развитие геодезического и картографического потенциала, уже созданного к этому времени.

Геодезическое обеспечение потребителей в континентальных и национальных системах координат

Как уже было показано, одними из важных уровней системы геодезического обеспечения являются:

- распространение установленных систем координат, высот, гравиметрических измерений на заданную территорию;
- предоставление потребителям возможности определения местоположения в установленных системах координат, высот и гравиметрических измерений.

Классическим способом предоставления потребителям возможности определения местоположения является возможность привязки к пунктам геодезических, нивелирных и гравиметрических сетей и предоставление каталогов координат, высот и ускорений силы тяжести на этих пунктах. Пункты при этом должны быть расположены на удалении, обеспечивающем необходимую точность определения местоположения. Решение данной задачи обеспечивалось установлением плотности размещения пунктов на определенной территории.

Нормами плотности размещения пунктов государственных нивелирных, геодезических и гравиметрических сетей на территории Российской Федерации, принятыми в 2002 г. [66, 75], было регламентировано количество пунктов геодезических, нивелирных и гравиметрических сетей для трех типов территорий: поселения, иные территории и районы Крайнего Севера. Нормы плотности 2002 г. приведены в табл. 12.

Таблица 12

Территория	Количество пунктов на тыс. кв. километров				
	геодезических сетей всех классов	геодезических сетей сгущения	для спутниковых дифференциальных определений геодезических координат	нивелирных сетей	Гравиметрических сетей
Городские и сельские поселения, другие муниципальные образования	200	7800	20	250	-
Иные экономически освоенные территории, территории повышенного риска возникновения	33	77	1	50	0,2

чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также приграничные территории					
Районы Крайнего Севера и приравненные к ним районы	20	10	0,1	10	0,2

Нормы плотности размещения на территории Российской Федерации геодезических пунктов государственной геодезической сети, нивелирных пунктов государственной нивелирной сети и гравиметрических пунктов государственной гравиметрической сети, принятые в 2016 г. [18], существенно снижены и установлены для Российской Федерации в целом, без выделения категорий освоенности территорий. Нормы плотности 2016 г. приведены в табл. 13.

Таблица 13

	Вид пунктов	Среднее значение плотности размещения пунктов на территории Российской Федерации
1.	Пункты государственной геодезической сети, в том числе:	
	пункты фундаментальной астрономо-геодезической сети	не менее 1 пункта на 330 тыс. кв. км при общем количестве не менее 50
	пункты высокоточной геодезической сети	не менее 1 пункта на 36 тыс. кв. км при общем количестве не менее 470
	пункты спутниковой геодезической сети 1-го класса, пункты сетей триангуляции, сетей полигонометрии, доплеровских геодезических сетей, астрономо-геодезической сети 1-го и 2-го классов, геодезических сетей сгущения 3-го и 4-го классов	не менее 100 000 пунктов*
2.	Пункты государственной нивелирной сети, в том числе:	
	пункты нивелирных сетей I, II классов (главная высотная основа Российской Федерации)	не менее 1 пункта на 0,1 тыс. кв. км при общем количестве не менее 170 000
	пункты нивелирных сетей III и IV классов	не менее 1 пункта на 0,034 тыс. кв. км при общем количестве не менее 500 000
3.	Пункты государственной гравиметрической сети	
	пункты фундаментальной гравиметрической сети, пункты гравиметрической сети 1-го класса	не менее 1 пункта на 24 тыс. кв. км при общем количестве не менее 710

* На территории Российской Федерации.

Одной из массовых технологий геодезического обеспечения потребителей для определения местоположения в настоящее время и в перспективе будет передача по сети Интернет измерительной и корректирующей информации с постоянно-действующих пунктов ФАГС и дифференциальных геодезических станций.

Нормами плотности размещения пунктов государственных нивелирных, геодезических и гравиметрических сетей на территории Российской Федерации, принятых в 2002 г. [66, 75], количество пунктов для спутниковых дифференциальных определений геодезических координат было регламентировано для трех типов территорий: поселения, иные территории и районы Крайнего Севера. Количество пунктов сетей дифференциальных геодезических станций, определенных в соответствии с нормами [66, 75] представлено в табл. 14.

Таблица 14

Территория	Площадь, тыс. кв. км	Норма плотности, пункт на тыс. кв. км	Количество пунктов
Городские и сельские поселения, другие муниципальные образования	170	20	3 400
Иные экономически освоенные территории, территории повышенного риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также приграничные территории	5 711	1	5 711
Районы Крайнего Севера и приравненные к ним районы	11 244	0,1	1 124
Итого	17 125		10 235

По состоянию на 1.09.2022 на территории Российской Федерации эксплуатируются порядка 1 930 пунктов сетей дифференциальных геодезических станций, созданных федеральными органами исполнительной власти, субъектами Российской Федерации, различными коммерческими организациями, что составляет всего лишь 18,8 % от количества СДГС по требуемым нормам плотности 2002 г. [66, 75].

Нормами плотности размещения на территории Российской Федерации геодезических пунктов государственной геодезической сети, нивелирных пунктов государственной нивелирной сети и гравиметрических пунктов государственной гравиметрической сети, принятых в 2016 г. [18], количество пунктов сетей дифференциальных геодезических станций не установлено.

В соответствии с действующим законодательством сети дифференциальных геодезических станций для обеспечения геодезических работ вправе создавать физические и юридические лица, органы государственной власти и органы местного самоуправления. Кроме владельцев сетей дифференциальных геодезических станций услуги по предоставлению измерительной и корректирующей информации оказывают организации, не

являющиеся собственниками этих сетей [71]. Размещение дифференциальных геодезических станций и пунктов геодезических сетей специального назначения, отчеты о создании которых помещены в федеральный фонд пространственных данных, приведено на сайте ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» в разделе «Геодезические сети специального назначения» [38]. Пример размещения дифференциальных геодезических станций в г. Санкт-Петербурге приведен на рис. 22.

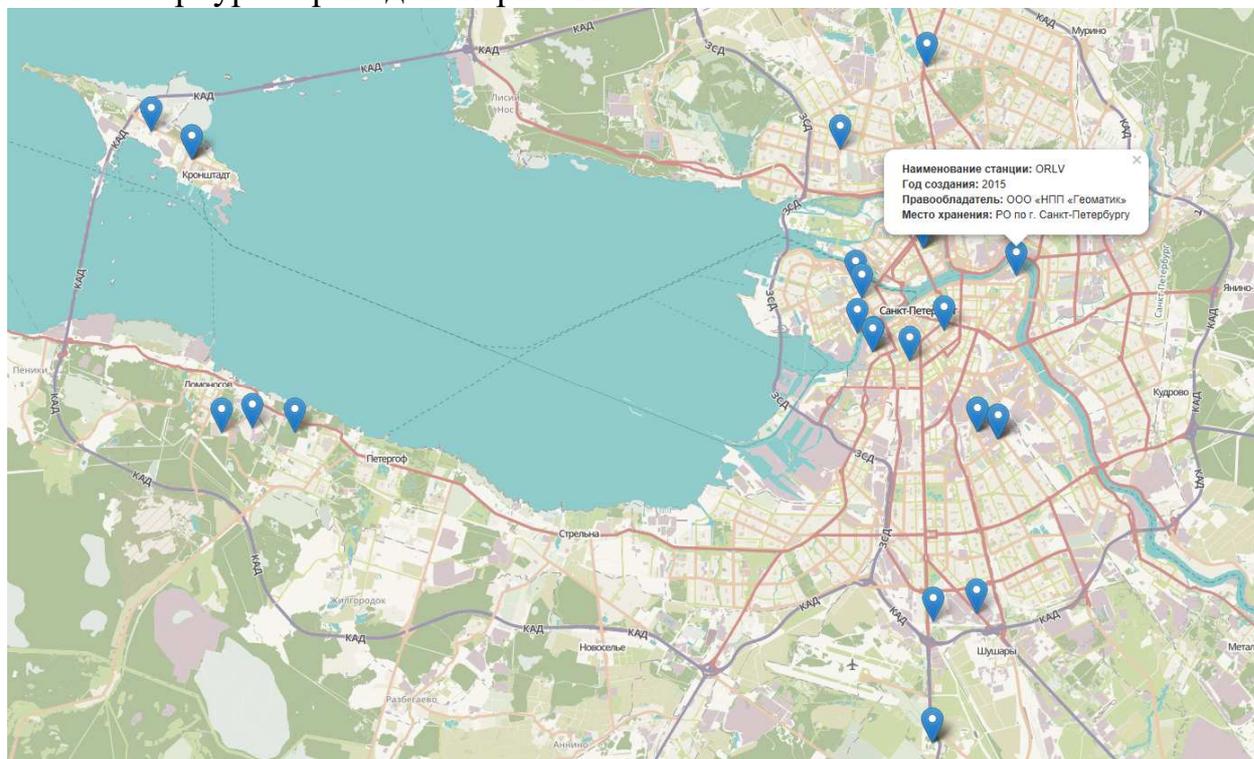


Рис. 22. Пример размещения дифференциальных геодезических станций в г. Санкт-Петербурге [38]

5 Региональные и местные (локальные) системы координат

Примерами региональных геодезических сетей и региональных систем координат в настоящее время являются национальные геодезические сети и системы координат государств, входящих в Европейский союз (ЕС). В связи с развитием интеграционных процессов и внедрением в практику геодезических работ использование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в странах Западной Европы было принято решение о создании единой системы геодезических координат Европы [21, 30]. Как было показано выше, такая система (ETRS/ETRF) и соответствующая ей геодезическая сеть (EPN) были созданы, после чего национальные геодезические сети и системы координат государств, входящих в Европейский союз (ЕС) перешли в разряд региональных.

Прообразом региональных геодезических сетей в нашей стране можно считать организованные Военно-топографическим депо (ВТД), а затем Военно-топографическим отделом (ВТО) и Корпусом военных топографов (КВТ) так называемые «губернские триангуляции» [15].

Прообразом региональных систем координат можно считать систему координат 1963 года (СК-63) - видоизмененный вариант системы 1942 года. Система координат СК-63 не являлась местной системой координат, так как была создана на всю территорию Советского Союза большими блоками, включающими до нескольких областей и республик. СК-63 была предназначена для создания топографических и специальных карт (землеустроительных, лесоустроительных, лесопожарных и др.) гражданского применения. Ее отличие от государственной системы координат 1942 года состояло только в изменении стандартной разграфки в проекции Гауса-Крюгера и использовании в европейской части СССР 3-х градусных зон. Схема расположения зон и разграфки листов карт масштаба 1 000 000 в системе координат СК-63 приведена на рис. 23.

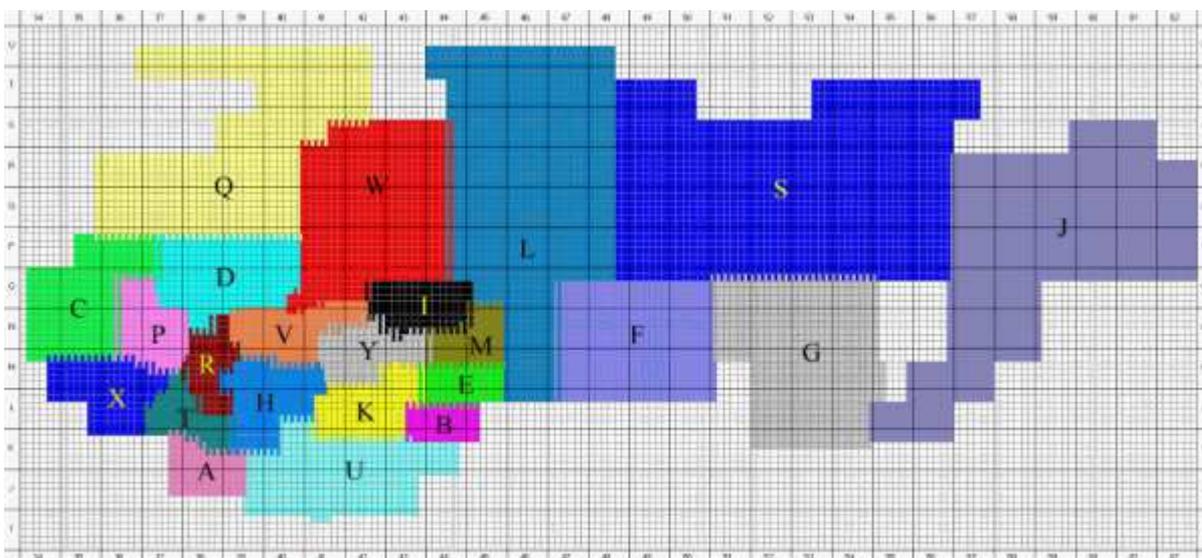


Рис. 23. Схема расположения зон и разграфки листов карт масштаба 1 000 000 в системе координат СК-63 [12, 21].

Положение осевых меридианов считалось неизвестным для предприятий и организаций, использующих созданную в этой системе координат продукцию. Предполагалось, что это будет служить основанием для понижения уровня секретности картографических и геодезических материалов. Точность СК-63 удовлетворяла потребности при создании карт масштаба 1:10 000 и мельче.

Система координат 1963 года просуществовала более 20 лет, и в 1988 году Постановлением Правительства СССР эта система была упразднена [12, 21]. Тем не менее, за это время в системе координат СК-63 года было создано довольно большое количество топографических и специальных карт гражданского применения. Желание сохранить возможность использования в той или иной форме этих материалов и, в тоже время, уйти от режимных ограничений привело к идее создания так называемых «местных систем координат» по субъектам Российской Федерации [4, 12]. Фактически «местные системы координат» субъектов Российской Федерации являются региональными системами координат так как большинство из них включают

несколько 3-х градусных зон проекции Гаусса-Крюгера, а в Сибири и на Дальнем Востоке несколько 6-ти градусных зон. Тем не менее, они формально соответствовали критерию площади, определенному Правилами установления местных систем координат 2007 г. [77]. В соответствии с Правилами [77] к местным системам координат были отнесены все системы координат, для ограниченных территорий, по своим размерам не превышающие территорию субъекта Российской Федерации (ранее в соответствии с действующими нормами размеры территорий местных систем координат не могли превышать 5 000 кв. км).

В историческом плане местные системы координат начали создаваться раньше региональных, государственных и тем более общеземных [12, 21]. В местных (условных) системах координат выполнялись съемки городов и крепостей в XVIII–XIX веках, например план губернского города Нижнего Новгорода 1848-1853 гг. на 6-ти листах - «ПЛАНЪ ГУБЕРНСКАГО ГОРОДА НИЖНЯГО-НОВГОРОДА НИЖЕГОРОДСКОЙ ГУБЕРНИИ. Снятъ Запаснымъ Землемѣромъ Медведевымъ и Класнымъ Топографомъ Лебедевымъ» [70].



Рис. 24. Лист 1 плана губернского города Нижнего Новгорода 1848-1853 гг. с координатной сеткой и масштабной линейкой [70]

Местные системы координат широко применялись для топографо-геодезического обеспечения городов и инженерных объектов. Основной целью сохранения и развития существующих местных систем координат, а также создания новых является стремление минимизировать на локальной территории разницу между измерениями на местности и на крупномасштабном плане.

Интенсивное развитие городов и необходимость топографо-геодезического обеспечения строящихся объектов обуславливали необходимость создания локальных геодезических построений и на их основе крупномасштабных топографических планов для локальных участков местности. По мере развития государственных геодезических сетей и создания государственных систем координат, все локальные сети были связаны с государственными. При этом выяснилось, что городские геодезические сети имели более высокую точность и лучшую внутреннюю согласованность.

Поэтому вопросы создания, реконструкции и развития городских геодезических сетей в научных работах и нормативно-технической литературе рассматривались отдельно от региональных и государственных геодезических построений. К моменту введения государственной системы координат в местных системах координат было создано большое количество крупномасштабных планов населенных пунктов и крупных инженерных объектов. В местных системах координат было составлено также значительное количество технической документации инженерной городской инфраструктуры и юридической документации, фиксирующей права на землю и недвижимость. Основной целью сохранения и развития существующих местных систем координат, а также создания новых является стремление минимизировать на локальной территории различия между измерениями на местности и на крупномасштабном плане или техническом чертеже.

Главным образом в силу этих причин местные системы координат существуют до настоящего времени даже в высокоразвитых зарубежных странах.

Именно из-за указанных причин к началу 50-х годов на территории СССР практически во всех крупных городах существовали местные системы координат, которые уточнялись при реконструкции и развитии городских геодезических сетей [12, 34, 35, 47, 53, 80, 85].

Еще одно оригинальное применение местных систем координат приведено в справочнике «Авиационная радионавигация» [33]. Местные системы координат применяют при определении навигационных элементов с помощью радионавигационных устройств (РНУ) малой и средней дальности. В горизонтальной сферической системе начало координат может совмещаться с радионавигационной точкой (РНТ). Поверхность Земли считается горизонтальной (что возможно при удалениях летательного аппарата (ЛА) от РНТ до 1000 км) и принимается за основную плоскость отсчета. Одну из осей системы совмещают с северным направлением S меридиана, проходящего через РНТ. Положение ЛА определяется дальностью D , азимутом A и углом возвышения (или высотой H). При измерениях скорости и угловых координат бортовыми РНУ используется связанная с ЛА система координат. Начало системы находится в центре масс ЛА. Ось X_c совмещается с продольной осью ЛА, а ось — с поперечной осью. Углы и положение вектора скорости в этой системе отсчитываются обычно от оси X_c . Используется также не связанная с ЛА горизонтальная прямоугольная система координат, начало которой совпадает с центром масс ЛА, а оси X и Z лежат в плоскости горизонта. Система является опорной при определении угловых положений ЛА, т. е. углов крена, тангажа и курса. [33].

Последняя версия стандарта ИСО 19111:2019 «Географическая информация – привязка по координатам» [103] поддерживает достаточно разнообразные реализации понятия систем координат, причем как статических так и динамических. Система координат может:

- быть геодезической и применяться на национальной или региональной основе;

- применяться локально, например, для здания или строительной площадки;
- локально применяться к изображению или датчику изображения;
- быть привязанной к движущейся платформе, такой как автомобиль, корабль, самолет или космический корабль. Такая система координат может быть связана со второй системой координат, которая связана с землей посредством преобразования, включающего элемент времени и т.д. [103].

Региональные системы координат

«Губернские триангуляции» XVIII в.

Организованные в XVIII в. Военно-топографическим депо (ВТД), а затем Военно-топографическим отделом (ВТО) и Корпусом военных топографов (КВТ) так называемые «губернские триангуляции» [15] были созданы на территории таких губерний, как: Виленская, Курляндская, Гродненская, Минская, Петербургская, Новгородская, Псковская, Могилевская, Смоленская, Московская, Закавказская, Северо-Кавказская, Приволжская, Оренбургская, Уральская, Бессарабская, Крымская, а в последствии и Туркестанская. Из-за недостатка сил, средств и времени триангуляции регионов и отдельных губерний развивались независимо друг от друга, каждая от своих исходных начал. Исходными геодезическими датами служили, в лучшем случае, координаты астрономических обсерваторий, а чаще всего астрономические координаты рядовых пунктов, в качестве которых нередко выбирались колокольни. В Москве, например, была выбрана колокольня Ивана Великого в Кремле. Линейный масштаб задавался базисами. Ошибки в определениях астрономических координат, особенно долгот, ошибки измерения базисов и азимутальной ориентировки вызывали большие расхождения геодезических координат на стыках триангуляций. Расхождения нередко доходили до 200 - 300 метров. Для исключения разногласий в координатах при вычислениях использовался так называемый «согласующий эллипсоид». По непонятным причинам ВТД, а впоследствии ВТО не установили единого для всей страны земного эллипсоида. Математическая обработка геодезических измерений велась на эллипсоидах: Вальбека, Бесселя и Кларка. Это осложняло анализ причин разногласий в координатах смежных триангуляций, и приводило к разрывам в топографических съемках [15].

Местные системы координат субъектов Российской Федерации

Необходимость выполнения земельно-кадастровых работ с использованием довольно большого количества топографических и специальных карт гражданского применения, созданных за продолжительное время в системе координат СК-63 года и, в тоже время, стремление уйти от режимных ограничений привело к идее создания местных систем координат по субъектам Российской Федерации. Разработанные 29 НИИ Минобороны России по заказу Росземкадастра местные системы координат субъектов Российской Федерации основаны на СК-63. За основу каждой местной системы принят тот блок системы СК-63, который покрывает всю территорию субъекта Российской

Федерации или большую ее часть. При выборе исходных блоков СК-63 предпочтение отдавалось блокам с трехградусными зонами. Если всю территорию субъекта Российской Федерации не покрывает ни один блок с трехградусными зонами, то за исходный принят блок с шестиградусными зонами. Блоки с шестиградусными зонами являются исходными, в основном, в северных территориях России.

Каждая местная система координат субъекта Российской Федерации имеет название «Местная система координат-NN», где NN - код субъекта Российской Федерации.

В местных системах субъектов Российской Федерации применяется Балтийская система высот.

На территорию каждого субъекта Российской Федерации, кроме Москвы и Санкт-Петербурга, составлены каталоги координат и высот геодезических пунктов в местных системах и списки координат на каждый административный район. Основой для составления местных каталогов являлись изданные каталоги координат пунктов государственной геодезической сети 1-4 классов в системе СК-42.

Если на территорию субъекта Российской Федерации приходится две или более зон проекции Гаусса, то в каталогах списки координат и высот сгруппированы по зонам. Для каждой зоны составлена отдельная книга. В каждой книге кроме основного списка приведены списки координат и высот на полосы перекрытия с соседними зонами. Полоса перекрытия составляет 30' [4]. Общее описание местных систем координат субъектов Российской Федерации приведено в табл. 15.

Таблица 15

№ МСК	Название административно-территориального образования	Площадь, тыс. км2	Номера зон	L1, °	Ширина зоны, °	№ МСК	Название административно-территориального образования	Площадь, тыс. км2	Номера зон	L1, °	Ширина зоны, °
	г. Москва	1,0				44	Костромская область	60,1	1-3	41 33	3
	г. Санкт-Петербург	2,0				45	Курганская область	71,0	1-3	61 02	3
1	Республика Адыгея (Адыгея)	7,6	1-2	37 59	3	46	Курская область	29,8	1-2	35 29	3
2	Республика Башкортостан	143,6	1-2	55 02	3	47	Ленинградская область	83,9	1-3	27 57	3
3	Республика Бурятия	351,3	1-6	100 02	3	48	Липецкая область	24,1	1-2	38 29	3
4	Республика Алтай	92,6	1-2	85 28	3	49	Магаданская область	461,4	1-4	144 27	6
5	Республика Дагестан	50,3	4	37 59	3	50	Московская область	46,0	1-2	35 29	3
6	Республика Ингушетия	19,3	3	37 59	3	51	Мурманская область	144,9	1-2	32 02	6
7	Кабардино-Балкарская Республика	12,5	3	37 59	3	52	Нижегородская область	76,9	1-3	41 33	3
8	Республика Калмыкия	76,1	1-3	40 59	3	53	Новгородская область	55,3	1-3	29 29	3
9	Карачаево-Черкесская Республика	14,1	2	37 59	3	54	Новосибирская область	178,2	1-4	74 44	3
10	Республика Карелия	172,4	1-2	32 02	6	55	Омская область	139,7	1-2	71 44	3
11	Республика Коми	415,9	3-7	32 02	6	56	Оренбургская область	124,0	1-4	52 02	3
12	Республика Марий-Эл	23,2	1-2	47 33	3	57	Орловская область	24,7	1-2	35 29	3
13	Республика Мордовия	26,2	1	44 33	3	58	Пензенская область	43,2	1-2	43 03	3
14	Республика Саха (Якутия)	3103,2	1-10	108 27	6	59	Пермская область	160,6	1-3	53 33	3
15	Республика Северная Осетия – Алания	8,0	3	37 59	3	60	Псковская область	55,3	1-2	27 57	3
16	Республика Татарстан (Татарстан)	68,0	1-3	49 02	3	61	Ростовская область	100,8	1-3	37 59	3
17	Республика Тыва	170,5	1-3	87 31	6	62	Рязанская область	39,6	1-2	38 29	3
18	Удмуртская Республика	42,1	1-2	50 33	3	63	Самарская область	53,6	1-2	49 02	3
19	Республика Хакасия	61,9	2-3	81 31	6	64	Саратовская область	100,2	1-3	43 03	3
20	Чеченская Республика	19,3	3-4	37 59	3	65	Сахалинская область	87,1	1-5	142 43	3
21	Чувашская Республика - Чувашия	18,3	1	47 33	3	66	Свердловская область	194,8	1-2	60 03	6
22	Алтайский край	169,1	1-3	79 28	3	67	Смоленская область	49,8	1-2	32 29	3
23	Краснодарский край	76,0	1-2	37 59	3	68	Тамбовская область	34,3	1	41 29	3
24	Красноярский край	710,0	1-4	81 31	6	69	Тверская область	84,1	1-3	32 29	3
25	Приморский край	165,9	1-4	130 43	3	70	Томская область	316,9	1-6	74 44	3
26	Ставропольский край	66,5	1-2	40 59	3	71	Тульская область	25,7	1-2	35 29	3
27	Хабаровский край	788,6	1-6	130 43	3	72	Тюменская область	161,9	2-3	60 03	6
28	Амурская область	363,7	1-5	121 43	3	73	Ульяновская область	37,3	1-2	46 03	3
29	Архангельская область	410,7	2-4	32 02	6	74	Челябинская область	87,9	1-3	58 02	3
30	Астраханская область	44,1	1-2	46 03	3	75	Читинская область	412,5	1-5	109 02	3

№ МСК	Название административно-территориального образования	Площадь, тыс. км2	Номера зон	L1, °'	Ширина зоны, °	№ МСК	Название административно-территориального образования	Площадь, тыс. км2	Номера зон	L1, °'	Ширина зоны, °
31	Белгородская область	27,1	1-2	35 29	3	76	Ярославская область	36,4	1-2	38 33	3
32	Брянская область	34,9	1-2	32 29	3	79	Еврейская автономная область	36,0	1-2	130 43	3
33	Владимирская область	29,0	1-2	38 33	3	80	Агинский Бурятский автономный округ	19,0	2-3	109 02	3
34	Волгоградская область	113,9	1-2	43 03	3	81	Коми-Пермяцкий автономный округ	81	1-2	53 33	3
35	Вологодская область	145,7	1-5	35 33	3	82	Корякский автономный округ	301,5	1-3	158 28	6
36	Воронежская область	52,4	1-2	38 29	3	83	Ненецкий автономный округ	176,7	3-6	32 02	6
37	Ивановская область	21,8	1-2	38 33	3	84	Таймырский (Долгано-Ненецкий) автономный округ	862,1	1-6	81 31	6
38	Иркутская область	745,5	1-8	97 02	3	85	Усть-Ордынский Бурятский автономный округ	22,4	3-4	97 02	3
39	Калининградская область	15,1	1	21 27	3	86	Ханты-Мансийский автономный округ	523,1	1-5	60 03	6
40	Калужская область	29,9	1	35 29	3	87	Чукотский автономный округ	737,7	3-8	144 27	6
41	Камчатская область	170,8	1-2	158 28	6	88	Эвенкийский автономный округ	767,6	2-5	81 31	6
42	Кемеровская область	95,5	1-2	85 28	3	89	Ямало-Ненецкий автономный округ	750,3	2-5	60 03	6
43	Кировская область	120,8	1-3	47 33	3						

Первая попытка введения местных систем координат субъектов Российской Федерации была осуществлена в 2002 г. Приказ Росземкадастра «О введении местных систем координат» 2002 г. предписывал организовать обеспечение каталогами координат пунктов опорной межевой сети в местных системах координат территориальных органов Росземкадастра в соответствии с прилагаемым графиком, исключив передачу им ключей перехода от этих координат к государственным системам координат и подготовить в 3-месячный срок предложения о порядке и условиях передачи в Минобороны России и Роскартографию каталогов координат пунктов опорной межевой сети в местной системе координат и ключей перехода от этих координат к государственным системам координат.

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации «Об установлении единых государственных систем координат» 2000 г. государственными системами координат Российской Федерации являлись система геодезических координат 1995 года (СК-95) - для использования при осуществлении геодезических и картографических работ начиная с 1 июля 2002 г. и геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90) - для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

До завершения технических мероприятий, необходимых для перехода к использованию системы геодезических координат 1995 года (СК-95) было разрешено использовать единую систему геодезических координат (СК-42), введенную Постановлением Совета Министров СССР в 1946 г.

При реализации приказа Росземкадастра «О введении местных систем координат» 2002 г. каталоги координат и ключи перехода были образованы на основе каталогов координат пунктов государственной геодезической сети 1-4 классов в единой системе геодезических координат СК-42, а не в государственных системах координат Российской Федерации СК-95 и ПЗ-90.

Вторая, более успешная попытка введения местных систем координат субъектов Российской Федерации была осуществлена в 2007 г. Приказ Роснедвижимости «Об утверждении Положения о местных системах координат Роснедвижимости на субъекты Российской Федерации» 2007 г. предписывал организовать в установленном порядке передачу копии согласованного и утвержденного Положения о местных системах координат Роснедвижимости на субъекты Российской Федерации, параметров перехода (ключей) от местных систем координат к государственной системе координат и каталогов (списков) координат геодезических пунктов в местной системе координат в федеральный картографо-геодезический фонд.

К сожалению, было нарушено обязательное требование Правил установления местных систем координат [77] - обеспечение перехода от местной системы координат к государственной системе координат, который осуществляется с использованием параметров перехода (ключей). Параметры перехода (ключи) от местных систем координат к государственной системе координат и каталоги (списки) координат геодезических пунктов в местной системе координат,

переданные в федеральный картографо-геодезический фонд в соответствии с приказом Роснедвижимости «Об утверждении Положения о местных системах координат Роснедвижимости на субъекты Российской Федерации», по-прежнему были образованы на основе каталогов координат пунктов государственной геодезической сети 1-4 классов в единой системе геодезических координат СК-42, хотя организационно-технические мероприятия, необходимые для перехода к использованию государственной системы координат СК-95, определенные постановлением Правительства Российской Федерации «Об установлении единых государственных систем координат» 2000 г. были завершены еще в 2002 году.

Не является секретом, что взаимное положение пунктов ГГС в системах координат СК-42, СК-63, МСК-NN, характеризуется относительной погрешностью $1/40\ 000 - 1/150\ 000$ в зависимости от класса пунктов и региона. Взаимное положение пунктов ГГС в системе координат СК-95, характеризуется относительной погрешностью $1/300\ 000$ для любого региона Российской Федерации. Используя современные двухчастотные и двухсистемные геодезические спутниковые приемники, позволяющие достичь относительных погрешностей $1/500\ 000 - 1/1\ 000\ 000$, геодезисты-практики вынуждены были создавать локальные высокоточные спутниковые сети, как правило, на территории одного-двух административных районов, слабо связанные с пунктами ГГС (ОМС и другими специальными сетями). Такие сети, формально реализующие МСК-NN, обеспечивают необходимую и достаточную точность на ограниченной территории и значительные искажения на границах с аналогичными построениями в других административных районах. Была создана ситуация повторяющая события XIX века, когда было начато уравнивание разрозненных, так называемых «губернских триангуляций», покрывавших страну от западных границ до Урала, включая Кавказ, не связанных между собой и имеющих значительные искажения на их стыках.

Ситуация была исправлена только в 20-х годах, когда были созданы нелинейные матрицы корректирующих поправок к МСК-NN.

Бурная дискуссия о целесообразности применения «местных систем координат» субъектов Российской Федерации была развернута в геодезических изданиях как до их введения в 2000 – 2002 гг., так и после в 2009 – 2012 гг. [21]. Дискуссия продолжается и в настоящее время [54]. В конечном счете, победила точка зрения Росреестра, и «местные системы координат» субъектов Российской Федерации пытаются вытеснить из обихода местные системы координат населенных пунктов, невзирая на методические погрешности и реально недостаточную точность региональных систем координат для обеспечения инженерно-геодезических работ в городах и на инженерных объектах. К сожалению, сбылось пророческое предсказание, сделанное в 2001 году «Каждому ведомству свои геодезические сети? Каждой отрасли свою геодезию?» [21].

Местные (локальные) системы координат

Понятие местных систем координат при строительстве городов и инженерных объектов широко использовалось в 50-е – 70-е годы в таких известных монографиях по инженерной геодезии, как «Городская полигонометрия» 1952 г., «Практическое руководство по городской и инженерной полигонометрии», 1954 г., «Курс инженерной геодезии (геодезические работы при строительстве городов и

тоннелей)» 1974 г., «Справочное пособие по съемке городов» 1974 г., «Городская полигонометрия» 1979 г., в нормативных документах «Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5 000, 1:2 000» 1955 г., «Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000 и 1:500» 1973 г., «Инструкция по топографо-геодезическим работам при инженерных изысканиях для промышленного, сельскохозяйственного, городского и поселкового строительства. СН 212-73», в сборниках совещаний «Всесоюзное совещание по проблемам топографических съемок городов и подземных коммуникаций» 1974 г., «Проблемы математической обработки геодезических сетей» 1979 г., «Совершенствование программы и схемы построения опорных геодезических сетей на территории городов» 1979 г., в ряде статей в периодических изданиях.

Понятие местных систем координат, как особой геодезической категории, сформировалось в 80-х годах после широкомасштабного развертывания Главным управлением геодезии и картографии при Совете Министров СССР (ГУГК при СМ СССР) работ по топографической съемке населенных пунктов в масштабах 1:2 000 и 1:5 000. Практический опыт работ ряда аэрогеодезических предприятий ГУГК при СМ СССР по реализации комплексных объектов, включающих реконструкцию городских геодезических сетей, их привязку к государственной геодезической сети и переуравнивание, отражен в переработанном «Справочном пособии по съемке городов» 1986 г. [61], в таких нормативных документах, как «Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000 и 1:500» 1982 г. [55], «Руководство по математической обработке геодезических сетей и составлению каталогов координат и высот пунктов в городках и поселках городского типа» 1990 г. [80], а также в монографиях «Городская полигонометрия» 1986 г. [88], «Математическая обработка городских геодезических сетей» 1992 г. [47].

Исходя из своего назначения – геодезическое обеспечение работ в городах и на инженерных объектах, основной целью создания местных систем координат было максимальное совпадение измерений на местности и на топографических планах. Эта цель и была реализована практически во всех местных системах координат путем выбора начала местной системы координат (а особенно осевого меридиана) в центре территории города или инженерного объекта. При этом ориентировка местной системы координат, как правило, осуществлялась по направлению приближенному к местному меридиану, а не осевому меридиану ближайшей 3-х или 6-ти градусной зоны. Вторым условием был выбор поверхности относимости максимально приближенной к средней нормальной высоте территории.

Официальное определение термина «Местная система координат» в нормативных правовых актах Российской Федерации впервые дано в Правилах установления местных систем координат 2007 г. [77]. «Под местной системой координат понимается условная система координат, устанавливаемая в отношении ограниченной территории, не превышающей территорию субъекта Российской Федерации, начало отсчета координат и ориентировка осей координат которой смещены по отношению к началу отсчета координат и ориентировке осей координат единой государственной системы координат, используемой при осуществлении геодезических и картографических работ (далее - государственная система координат).

Местные системы координат устанавливаются для проведения геодезических и топографических работ при инженерных изысканиях, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, межевании земель, ведении кадастров и осуществлении иных специальных работ.

Обязательным требованием при установлении местных систем координат является обеспечение возможности перехода от местной системы координат к государственной системе координат, который осуществляется с использованием параметров перехода (ключей).

Инициаторами установления местных систем координат могут являться федеральные органы исполнительной власти, исполнительные органы государственной власти субъектов Российской Федерации, органы местного самоуправления, иные субъекты отношений в области геодезической и картографической деятельности (далее - заказчики).

Местная система координат устанавливается на основании положения об этой системе, утверждаемого заказчиком по согласованию с Федеральным агентством геодезии и картографии (его территориальным органом)» [77].

Правила установления местных систем координат были отменены постановлением Правительства Российской Федерации в 2017 г. Утвержденный приказом Минэкономразвития России «Порядок установления местных систем координат» 2017 г. уже не содержал точного определения понятия «местные системы координат», хотя практически дублировал описание всех характерных особенностей местных систем координат. «Местная система координат устанавливается в отношении ограниченной территории, не превышающей территорию субъекта Российской Федерации.

Начало отсчета координат, направления осей координат местной системы координат не должны совпадать с началом отсчета координат, направлениями осей координат государственной системы координат.

При проектировании, строительстве, реконструкции и содержании линейных объектов (линии электропередачи, линии связи, в том числе линейно-кабельные сооружения, трубопроводы, автомобильные дороги, железнодорожные линии и другие подобные сооружения) местные системы координат устанавливаются на полосу отвода линейных объектов и их охранные зоны по всей их протяженности без ограничения территории». Приказ Минэкономразвития России «Порядок установления местных систем координат» 2017 г. неоправданно расширял сферу применения местных систем координат, куда были включены не только обеспечение проведения геодезических и картографических работ «при осуществлении градостроительной и кадастровой деятельности, землеустройства, недропользования, иной деятельности», но также «при установлении, изменении и уточнении прохождения Государственной границы Российской Федерации (включая ее делимитацию, демаркацию), при установлении, изменении границ между субъектами Российской Федерации, границ муниципальных образований». Правда и этот нормативный документ отменен постановлением Правительства Российской Федерации с 1 января 2021 г. В настоящее время порядок установления местных систем координат регламентируется приказом Росреестра «Об утверждении Порядка установления местных систем координат» 2020 г. [25]. Новый порядок во

многим дублирует приказ Минэкономразвития России «Порядок установления местных систем координат» 2017 г., несколько сократил сферу применения местных систем координат исключив обеспечение проведения геодезических и картографических работ при установлении, изменении и уточнении прохождения Государственной границы Российской Федерации (включая ее делимитацию, демаркацию), но сохранив обеспечение проведения геодезических и картографических работ при установлении, изменении границ между субъектами Российской Федерации, границ муниципальных образований. Если с муниципальными границами более менее понятно, то установление местной системы координат для обеспечения проведения геодезических и картографических работ при установлении, изменении границ между субъектами Российской Федерации при наличии в каждом субъекте своей местной системы координат выходит за рамки понимания.

Другим недостаточно обоснованным положением действующего Порядка установления местных систем координат 2020 г. [25] является положение о том, что при определении параметров перехода вычисляются сдвиг начала отсчета системы координат, разворот осей системы координат, масштабный коэффициент, то есть рекомендованы только упрощенные формулы преобразования координат. Тогда, как уже в 80-90-е годы для значительно меньших территорий были рекомендованы точные и, как исключение, приближенные формулы преобразования координат и соответственно точные и приближенные параметры перехода [47, 80].

Вопросы создания и функционирования местных систем координат в научных работах и нормативно-технической литературе традиционно рассматривались в комплексе с вопросами создания, реконструкции и развития городских геодезических сетей, т.е. для ограниченных территорий, на которых, во-первых, важным требованием было минимальное расхождение между измерениями линий на местности и по координатам в местной системе координат (на крупномасштабном плане), а во-вторых - требование минимальных искажений, обусловленных редукцией всех измерений на плоскость. Первое требование достигалось за счет использования поверхности относимости, не совпадающей с поверхностью эллипсоида государственной системы координат, а второе – за счет использования проекции Гаусса-Крюгера с осевым меридианом в центре населенного пункта.

Таким образом, местные системы координат представляли собой плоские прямоугольные геодезические координаты на ограниченной территории.

Косвенное определение местных систем координат было приведено в Руководстве по математической обработке геодезических сетей и составлению каталогов координат и высот пунктов в городах и поселках городского типа [80]. В Руководстве была приведена форма Справки о местной системе координат, а в Пояснении к составлению справки о местной системе координат было приведено следующее определение.

Местная система координат (МСК) задается следующими параметрами:

1. Координаты X_0 , Y_0 местного начала в Системе 1942 г. в проекции Гаусса, в 6° зоне.
2. Координаты x_0 , y_0 местного начала координат местной системы.

3. Долгота L_0 осевого меридиана местной системы.

4. Угол поворота γ осей координат местной системы в точке местного начала координат.

5. Масштаб МСК относительно Системы 1942 г. в точке местного начала координат.

6. Высота поверхности (плоскости) относимости Н₀гор к которой отнесены измерения и координаты в местной системе.

7. Референц-эллипсоид, к которому отнесены измерения в МСК (Красовского - в Системе 1942 г., Бесселя - в Системе 1932 г.). Название референц-эллипсоида можно не помещать. Достаточно указать год Системы.

8. Формулы преобразования.

Все эти параметры, в том числе долготу L_0 осевого меридиана, необходимо знать для надлежащей математической обработки городских геодезических сетей.

9. Система высот (Балтийская, Балтийская 1977 г. или местная).

Вопросы уточнения местных систем координат изложены в Руководстве по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS [81]. Процедура уточнения параметров местной системы координат предусмотрена Технологической схемой обработки городских геодезических сетей. При установлении окончательных параметров местной системы координат составляется схема деформации старой сети (изолиний расхождения координат) и справка о местной системе координат с приведением уточненных параметров [81]:

1. Координаты X_0, Y_0 начала местной системы координат в государственной системе координат в проекции Гаусса-Крюгера, в 6° зоне.

2. Координаты x_0, y_0 начала местной системы координат в местной системе координат.

3. Долгота L_0 осевого меридиана, проходящего через начало местной системы координат.

4. Угол поворота осей координат местной системы в точке местного начала координат.

5. Высота поверхности (плоскости) относимости Н₀, к которой отнесены измерения и координаты в местной системе.

6. Система высот.

В соответствии с Порядком установления местных систем координат 2020 г. технический отчет об установлении местных систем координат согласовывается Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии при установлении местной системы координат на всю территорию субъекта Российской Федерации, а также на полосы отвода и на охранные зоны линейных объектов в отношении территории, выходящей за территорию одного субъекта Российской Федерации. В остальных случаях технический отчет согласовывается территориальным органом Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии. Этот же порядок согласования предусмотрен действующим Порядком установления местных систем координат»2020 г. [25].

Основной причиной необходимости периодической реконструкции городских геодезических сетей является то, что территория города – это территория

интенсивной хозяйственной деятельности, сопровождающейся не только все возрастающими потребностями в геодезических данных, но и регулярным изменением положения геодезических пунктов и даже их уничтожением вследствие природных, техногенных и антропогенных воздействий.

Широкое распространение новых технических средств - спутниковых геодезических приемников, электронных тахеометров привело к тому, что на территориях многих городов стали создаваться различными организациями независимые геодезические сети, которые в целом ряде случаев базировались на различных, слабо согласованных друг с другом координатных системах, а также на различных исходных высотных отметках. Сложившаяся ситуация потребовала существенного пересмотра традиционных подходов к проблеме создания и реконструкции городских геодезических сетей.

Современные спутниковые методы открыли возможность объединения различных геодезических построений и создания единой городской геодезической сети, удовлетворяющей запросам различных заинтересованных организаций.

При создании и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых приемников необходимо учитывать следующие особенности:

- наличие практически во всех городах локальной системы координат, созданной с целью уменьшения расхождений при измерениях на физической поверхности и на крупномасштабных планах;

- необходимость сохранения городской системы координат при выполнении реконструкции, переуравнивания городских геодезических сетей и других работах с целью сохранения большого количества точных (5-10 см) топографических, инженерно-геодезических и кадастровых материалов;

- наличие в крупных городах специальных геодезических сетей, предназначенных для строительства метро и редуцированных, как правило, на свою поверхность относимости;

- наличие в ряде городов специальных геодинимических сетей, точность которых отличается от точности городских геодезических сетей.

В соответствии с Программой разработки новых и переработки ранее утвержденных нормативно-технических актов и нормативных документов по производству на период 1999 - 2000 годы, в 2000 г. был разработан проект «Руководства по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS», который был утвержден в 2003 г. в качестве отраслевого нормативного акта [81].

В Руководстве изложены общие сведения о глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS, приведена классификация спутниковых городских геодезических сетей, освещены принципы построения и этапы создания и реконструкции городских геодезических сетей с использованием современных технологий.

Идеи и технологии, заложенные в Руководство обсуждались в 1995 г. на международной конференции «Сферы применения GPS-технологий», где эта проблема поднималась в нескольких докладах, в 1999 г. на международной конференции «220 лет геодезическому образованию в России», где была

организована работа круглого стола «GPS-технологии при развитии городских геодезических сетей».

За прошедшие 20 лет требования к точности городских геодезических сетей, технологии их реконструкции, изложенные в Руководстве [81], устарели и уже не в полной мере соответствуют современным техническим возможностям. Очевидно, что настало время пересмотра этого нормативного документа с учетом новых технических и технологических возможностей.

Точность плоских местных систем координат на территории размером более 20 км вдоль параллели не удовлетворяют требованиям, предъявляемым при инженерных изысканиях, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, осуществлении иных специальных работ [47, 80]. Не является выходом переход на эллипсоидальные координаты, так как уже упоминалась значительная разница параметров современных эллипсоидов. Первые предложения по использованию пространственных (геоцентрических) местных систем координат были сделаны в работах Г. В. Демьянова [12, 52]. Эти предложения резко критиковались в рамках упомянутой дискуссии в работах [4, 40], но в итоге были реализованы в системе координат г. Москвы [37, 82].

В 2012 году на 8-й Международной научно-практической конференции «Геопро пространственные технологии и сферы их применения» в рамках 9-й Международной промышленной выставки GEOFORM+2012, было проведено секционное заседание «Опыт и проблемы создания сетей ГНСС в России на территории городов и регионов» и семинар «Применение Базовой региональной системы навигационно-геодезического обеспечения города Москвы на основе ГЛОНАСС/GPS (СНГО Москвы)», на которых рассматривались вопросы точности геопро пространственных данных в различных системах координат, реализации пространственных (геоцентрических) местных систем координат, сетей постояннодействующих референчных станций точного позиционирования [21].

Исходя из потребностей, местные системы координат городов и геодезические сети, на которых они не только имеют право на жизнь, но по-прежнему востребованы и должны развиваться.

Как уже было сказано выше наиболее важным требованием для местных систем координат городов и геодезических сетей, на которых они основаны было и остается минимальное расхождение между измерениями линий на местности и по координатам в местной системе координат (на крупномасштабном плане).

Погрешности (расхождения между измерениями линий на местности и по координатам или на крупномасштабном плане) в местных системах координат можно разделить на следующие основные группы:

- погрешности, вызванные неточностью исходных данных;
- погрешности, вызванные искажениями картографической проекции (для проекции Гаусса-Крюгера – связанные с удалением от осевого меридиана);
- погрешности, связанные с разностью высот места измерений и поверхности относимости;
- погрешности, связанные с немотивированным использованием масштабного коэффициента в координатных преобразованиях.

В таблице 16 приведены ориентировочные значения погрешностей для линии 1 000 м.

Таблица 16

Источник погрешностей	СКП, см
Неточность исходных данных: - для СК-42, СК-63, МСК-NN; - для СК-95; - для пространственной местной системы координат (ПМСК)	20-100 3 0,3
Удаление от осевого меридиана для проекции Гаусса-Крюгера	0-50
Разность высот места измерений и поверхности относимости	0-10
Немотивированное использование масштабного коэффициента в координатных преобразованиях	20-200

Неполный учет этих погрешностей не позволяет выполнить точностные требования нормативно-технических документов по выполнению топографических, инженерно-геодезических и кадастровых работ.

На рис. 25 представлены зоны влияния на площади участков при удалении от осевого меридиана проекции Гаусса-Крюгера для местной системы координат Нижегородской области МСК-52 [54].

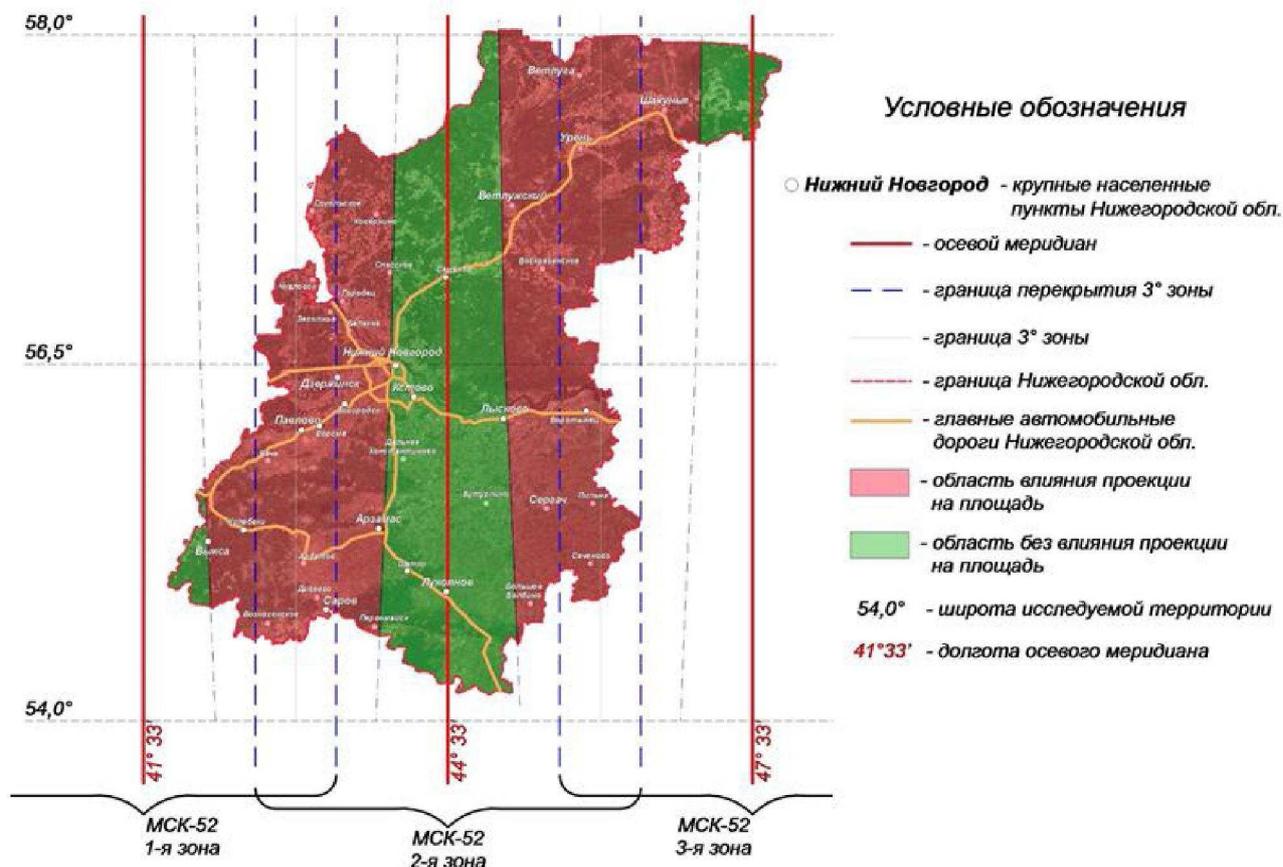


Рис. 25. Зоны влияния на площади участков при удалении от осевого меридиана проекции Гаусса-Крюгера для местной системы координат Нижегородской области МСК-52 [54]

В связи со снятием режимных ограничений по точности координат географических объектов в государственной системе координат неоднократно предлагалось все результаты геодезических и картографических работ для создания Государственного земельного кадастра, Государственного кадастра объектов недвижимости (кроме сведений, позволяющих вычислить или уточнить координаты пунктов государственных или специальных геодезических сетей в зонах режимных ограничений) оформлять в государственной системе координат для внеселитебных территорий. На территории населенных пунктов результаты работ оформлять в более точных местных системах координат населенных пунктов. Границы населенных пунктов оформлять в двух системах координат: в государственной системе координат и в местной системе координат населенного пункта.

Для практической реализации предлагалось просить Правительство Российской Федерации дать поручение Минэкономразвития, Минобороны и Минтрансу с участием Минрегиона проработать вопрос использования единой государственной системы координат для геодезических и картографических работ, включая работы по делимитации и демаркации административных границ, работ по наземной навигации, создания и ведения Государственного кадастра объектов недвижимости.

Кроме того, необходимо осуществить реконструкцию городских геодезических сетей на основе современных спутниковых технологий ГЛОНАСС/GPS с целью повышения точности, связи с государственной геодезической сетью, получения уточненных параметров связи с государственной геодезической системой координат и приведения в соответствие с нормами плотности размещения пунктов на территории населенных пунктов.

Нормы плотности государственных нивелирных, геодезических и гравиметрических сетей на территории Российской Федерации [66, 75], устанавливали дифференцированные требования к плотности пунктов для трех категорий территорий Российской Федерации:

- городские и сельские поселения, другие муниципальные образования;
- иные экономически освоенные территории, территории повышенного риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также приграничные территории;
- районы Крайнего Севера и приравненные к ним районы.

Действующие в настоящее время Нормы плотности размещения на территории Российской Федерации геодезических, нивелирных и гравиметрических пунктов [18] устанавливают обобщенные (и существенно сниженные) единые требования для всей территории страны, не выделяя территорий населенных пунктов.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют действующие нормативно-технические документы, регламентирующие плотность пунктов на территории населенных пунктов. Если в Инструкции по топографической съемке 1982 г. [55] и Инструкции по топографо-геодезическим работам при инженерных изысканиях для промышленного, сельскохозяйственного, городского и поселкового строительства [56] были установлены нормы плотности геодезических пунктов не менее 4 пунктов на 1 кв. км на застроенных территориях и 1 пункт на 1 кв. км на

незастроенных территориях, то уже в СНиП 11-02-96 эти требования отсутствуют, а в действующих СП 47.13330.2016 применена обтекаемая формулировка «геодезическая основа сгущается до плотности, необходимой и достаточной для выполнения инженерных изысканий, установкой на местности геодезических пунктов временного, долговременного или постоянного закрепления» без указания конкретных значений.

6 Методы преобразования координатных систем и параметры перехода

Казалось бы, проблемы преобразования координат пунктов из одной системы координат в другую не должно быть. В 2001 году постановлением Госстандарта России от 9 августа 2001 г. № 327-ст был впервые принят и введен в действие ГОСТ Р 51794-2001 Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек, в котором были приведены основные формулы и параметры преобразования координат между такими системами координат, как ПЗ-90, СК-42 и МГС-84 (WGS-84). В 2008 году стандарт был переработан и утвержден под названием ГОСТ Р 51794-2008 Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.

В 2013 году Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации был принят ГОСТ 32453-2013 ГЛОНАСС. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек, подготовленный на основе применения ГОСТ Р 51794-2008. В 2017 году Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации был принят действующий в настоящее время ГОСТ 32453-2017 ГЛОНАСС. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек [7]. В действующем стандарте приведены основные формулы и параметры преобразования координат между такими системами координат, как ПЗ-90.02, ПЗ-90.11, СК-42, СК-95, ГСК-2011, WGS-84 (G1150), TRF-2008, а также алгоритм учета эпохи параметров преобразования при преобразовании координат из одной системы в другую. К сожалению, в действующем стандарте для преобразования геодезических координат в плоские прямоугольные координаты и обратно приведены только формулы для проекции Гаусса-Крюгера на эллипсоиде Красовского, которые неприменимы для системы координат ГСК-2011. Кроме того, в стандарте «Методы преобразований координат определяемых точек» из 28 терминов и определений только одна позиция относится к преобразованию координат:

- параметры трансформирования систем координат: параметры, с помощью которых выполняется преобразование координат из одной системы координат в другую.

ГОСТ Р 52572-2006 Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования [8], соответствующий международному стандарту ISO 19111:2003 «Geographic information - Spatial referencing by coordinates» содержит значительное количество терминов относящихся как к системам координат, так и к процессам их преобразования.

Мы уже рассматривали термины, относящиеся к системам координат:

- прямоугольная система координат - cartesian coordinate system;
- составная система координат - compound coordinate reference system;
- координатная система отсчета - coordinate reference system;
- система координат - coordinate system;
- геодезическая система координат - ellipsoidal coordinate system geodetic coordinate system;
- полярная система координат - polar coordinate system;
- система координат проекции - projected coordinate reference system;
- геодезическая отсчетная основа (геодезическая основа)
- координатная основа.

ГОСТ Р 52572-2006 ввел ряд терминов относящихся к вопросам преобразования координат:

- **картографическое проектирование:** перевычисление координат, когда одна координатная система является геодезической, а другая - плоской.

- **операции с координатами:** изменение координат пространственных объектов с использованием их математической связи при переходе от одной системы координат к другой.

- **перевычисление координат:** операция с координатами пространственных объектов, основанная на математически строго определенной связи, при переходе из одной системы координат в другую, используя одни и те же исходные геодезические даты.

- **трансформирование координат:** операция с координатами пространственных объектов при переходе от одной координатной системы отсчета к координатной системе отсчета, основанной на других датах.

Примечание. При трансформировании координат используют параметры, которые могут быть определены опытным путем с использованием набора пунктов, общих для обеих координатных систем отсчета. (ГОСТ Р 52438-2005, статья 45)

- **точность трансформирования:** близость значений трансформированных координат к принятым за истинные в целевой координатной отсчетной системе.

Примечание. Трансформирование часто применяется для географических данных с целью преобразовать их в желаемую отсчетную систему, но если параметры трансформирования определены опытным путем, то для такого преобразования характерны соответствующие ошибки.

- **точность перевычисления:** близость преобразованных значений координат к их истинным значениям.

Преобразование одной координатной системы в другую координатную систему разного типа (геоцентрических прямоугольных координат в геодезические эллипсоидальные и обратно)

Преобразование геоцентрических прямоугольных координат в геодезические эллипсоидальные и обратно уже было рассмотрено ранее. И эллипсоидальная и пространственная прямоугольная системы координат являются геодезическими по определению, несмотря на различия между ними.

Аналогичные формулы с несколько другими обозначениями рекомендованы национальным стандартом ГОСТ Р 52572-2006 Географические информационные

системы. Координатная основа. Общие требования [8], межгосударственным стандартом ГОСТ 32453-2017 Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек [7], Специализированным справочником Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11) [20] и др.

Принято различать два типа преобразования координат при переходе из одной системы в другую:

- преобразование пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием точно определенных параметров перехода;

- преобразование одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием пунктов, координаты которых известны в двух системах.

При этом различают трехмерные, двумерные и одномерные методы преобразования (трансформирования) [2].

Преобразование пространственных прямоугольных и геодезических эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием точно определенных параметров перехода (трехмерное преобразование)

Преобразование геоцентрических прямоугольных координат в другую координатную систему того же типа уже было рассмотрено ранее, формула (16).

Если начало новой системы координат относительно старой имеет сдвиг по координатным осям ΔX , ΔY , ΔZ , а направление осей совпадает, то координаты любой точки в новой системе X_1 , Y_1 , Z_1 , относительно старой определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} X_1 &= X + \Delta X, \\ Y_1 &= Y + \Delta Y, \\ Z_1 &= Z + \Delta Z. \end{aligned} \tag{17}$$

Или в векторном виде:

$$\bar{X}_1 = \bar{X} + \Delta\bar{X}.$$

Если же начала двух систем координат совпадают, а оси новой и старой систем расположены под некоторыми углами друг к другу α , β , γ , называемые углами Эйлера, то углы поворота координатных осей ω_X , ω_Y , ω_Z связаны с углами Эйлера α , β , γ соотношениями:

$$\begin{aligned} \omega_X &= \sin(\alpha + \beta), \\ \omega_Y &= \gamma \sin \alpha, \\ \omega_Z &= \gamma \cos \alpha. \end{aligned} \tag{18}$$

Обратный переход от углов поворота координатных осей ω_X , ω_Y , ω_Z к углам Эйлера α , β , γ задается выражениями:

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{\omega_Y}{\omega_Z}, \\ \beta &= \omega_X - \alpha, \\ \gamma &= \sin^{-1} \sqrt{\omega_Y^2 + \omega_Z^2}. \end{aligned} \tag{19}$$

Углы Эйлера позволяют определить долготный δL и широтный δB развороты новой и старой систем координат:

$$\begin{aligned} \delta L &= \alpha + \beta, \\ \delta B &= \gamma. \end{aligned} \quad (20)$$

Преобразование координат принято представлять в виде трех последовательных поворотов (рис. 26):

1) поворот на угол ω_Z вокруг оси OZ , при этом ось X перемещается в положение X' , а Y - в Y' ;

2) поворот на угол ω_X вокруг оси OX' , при этом ось Y' перемещается в положение Y_1 , а Z - в Z' ;

3) поворот на угол ω_Y вокруг оси OY_1 , при этом ось Z' перемещается в положение Z_1 , а X' - в X_1 .

Матрица поворота R при этом принимает следующий вид:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \omega_Y \cos \omega_Z - & -\sin \omega_Z \cos \omega_Y + & \sin \omega_Y \cos \omega_X \\ -\sin \omega_X \sin \omega_Y \sin \omega_Z & +\sin \omega_X \sin \omega_Y \cos \omega_Z & \sin \omega_X \\ -\sin \omega_Z \cos \omega_X & \cos \omega_X \cos \omega_Z & \sin \omega_X \\ \cos \omega_Z \sin \omega_Y + & \sin \omega_Z \sin \omega_Y - & \cos \omega_Y \cos \omega_X \\ +\sin \omega_X \cos \omega_Y \sin \omega_Z & -\sin \omega_X \cos \omega_Y \cos \omega_Z & \cos \omega_Y \cos \omega_X \end{pmatrix} \quad (21)$$

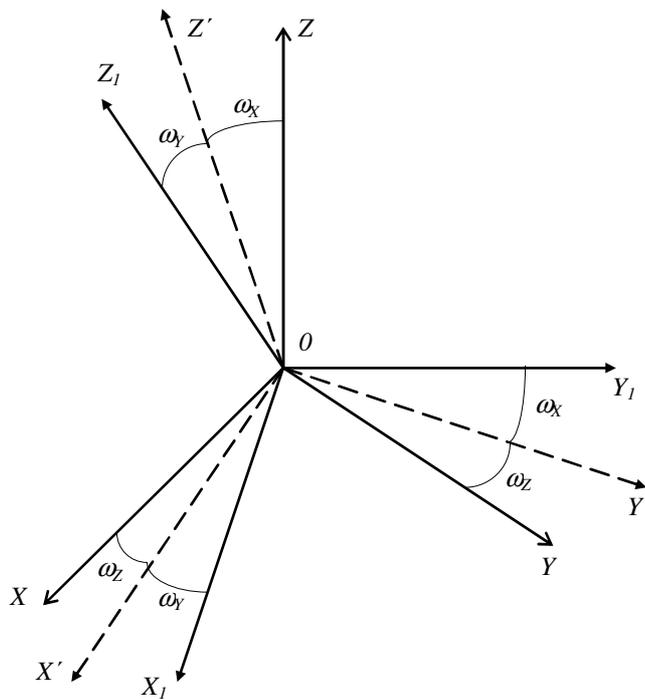


Рис. 26. Разворот осей координатных систем

Учитывая то, что углы поворота ω_X , ω_Y , ω_Z являются малыми, так что их вторыми степенями можно пренебречь, выражение (21) можно представить в следующем виде, формула (15):

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix}.$$

При одновременном изменении начала отсчета и ориентирования системы координат преобразования принимают вид:

$$\begin{aligned} X_1 &= X + \Delta X + \omega_Z Y - \omega_Y Z, \\ Y_1 &= Y + \Delta Y - \omega_Z X + \omega_X Z, \\ Z_1 &= Z + \Delta Z + \omega_Y X - \omega_X Y. \end{aligned} \quad (22)$$

или в векторном виде:

$$\bar{X}_1 = \bar{X} + \Delta\bar{X} + R\bar{X}.$$

В формулах (22) принято, что при переходе от одной системы координат к другой масштабы одинаковы. Для учета изменения масштаба следует в формулу преобразований ввести соответствующий коэффициент. Матрица масштабных преобразований в этом случае имеет вид:

$$T = \begin{pmatrix} \chi_X & 0 & 0 \\ 0 & \chi_Y & 0 \\ 0 & 0 & \chi_Z \end{pmatrix}, \quad (23)$$

а общее преобразование:

$$\bar{X}_1 = \bar{X} + \Delta\bar{X} + TR\bar{X}.$$

Обычно используют единственное значение масштабного коэффициента χ , а общее преобразование в этом случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} X_1 &= X + \Delta X + \chi(\omega_Z Y - \omega_Y Z), \\ Y_1 &= Y + \Delta Y - \chi(\omega_Z X + \omega_X Z), \\ Z_1 &= Z + \Delta Z + \chi(\omega_Y X - \omega_X Y). \end{aligned} \quad (24)$$

или в векторном виде (16):

$$\bar{X}_1 = \bar{X} + \Delta\bar{X} + \chi R\bar{X}.$$

Аналогичные формулы с несколько другими обозначениями рекомендованы национальным стандартом ГОСТ Р 52572-2006 Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования [8], межгосударственным стандартом ГОСТ 32453-2017 ГЛОНАСС. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек [7], Специализированным справочником Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11) [20], Документом 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) [105] и др.

Преобразование геодезических эллипсоидальных координат из одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием точно определенных параметров перехода выполняют по формулам:

$$\begin{aligned} B_1 &= B + \Delta B, \\ L_1 &= L + \Delta L, \\ H_1 &= H + \Delta H, \end{aligned} \quad (25)$$

где B, L - геодезические широта и долгота, выраженные в единицах плоского угла;

H - геодезическая высота, м;

$\Delta B, \Delta L, \Delta H$ — поправки к геодезическим эллипсоидальным координатам, определяемые по формулам:

$$\left. \begin{aligned}
\Delta B &= \frac{\rho}{(M+H)} \left(\frac{N}{a} e^2 \sin B \cos B \Delta a + \left(\frac{N^2}{a^2} + 1 \right) N \sin B \cos B \frac{\Delta e^2}{2} - \right. \\
&\quad \left. - (\Delta x \cos L + \Delta y \sin L) \sin B + \Delta z \cos B \right) - \\
&\quad - \omega_x \sin L (1 + e^2 \cos 2B) + \omega_y \cos L (1 + e^2 \cos 2B) - \rho m e^2 \sin B \cos B; \\
\Delta L &= \frac{\rho}{(N+H) \cos B} (-\Delta x \sin L + \Delta y \cos L) + \\
&\quad + \tan B (1 - e^2) (\omega_x \cos L + \omega_y \sin L) - \omega_z; \\
\Delta H &= \frac{a}{N} \Delta a + N (\sin B)^2 \frac{\Delta e^2}{2} + (\Delta x \cos L + \Delta y \sin L) \cos B + \Delta z \sin B - \\
&\quad - N e^2 \sin B \cos B \left(\frac{\omega_x}{\rho} \sin L - \frac{\omega_y}{\rho} \cos L \right) + \left(\frac{a^2}{N} + H \right) m.
\end{aligned} \right\} (26)$$

где ΔB , ΔL - поправки к геодезическим широте, долготе, угл. с;

ΔH - поправка к геодезической высоте, м;

B , L - геодезические широта и долгота, рад;

H - геодезическая высота, м;

Δx , Δy , Δz — линейные элементы трансформирования систем координат при переходе из системы в систему, м;

ω_x , ω_y , ω_z - угловые параметры трансформирования систем координат при переходе из системы в систему, угл. с;

m - масштабный элемент трансформирования систем координат при переходе из системы в систему;

$$\Delta a = a - a_1;$$

$$\Delta e^2 = e^2 - e_1^2;$$

$$a = \frac{a+a_1}{2};$$

$$e^2 = \frac{e^2+e_1^2}{2};$$

M - радиус кривизны меридианного сечения, определяемый по формуле $M = a(1 - e^2)(1 - e^2(\sin B)^2)^{-\frac{3}{2}}$;

N - радиус кривизны первого вертикала, определяемый по формуле $N = a(1 - e^2(\sin B)^2)^{-\frac{1}{2}}$;

a , a_1 - большие полуоси эллипсоидов в системах координат соответственно;

e^2 , e_1^2 - квадраты эксцентриситетов эллипсоидов в системах координат соответственно;

ρ - число угловых секунд в 1 радиане ($\rho = 206\,264,806''$).

Преобразование пространственных прямоугольных или эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную систему того же типа по достаточно строгим формулам с использованием точно определенных параметров перехода является достаточно простой задачей для трехмерных координатных систем.

В ГОСТ 32453-2017 Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек [7] приведены параметры преобразования между системой координат ПЗ-90.11 и системами координат ГСК-2011, WGS-84 (G1150), ITRF-2008.

Параметры преобразования между системами координат ПЗ-90.11 и ГСК-2011:

$$\begin{aligned}\Delta X &= 0,000 \text{ м}; \omega_X = -0,000562 \text{ ''}; \\ \Delta Y &= +0,014 \text{ м}; \omega_Y = -0,000019 \text{ ''}; \\ \Delta Z &= -0,008 \text{ м}; \omega_Z = -0,000053 \text{ ''}; \\ \chi &= -0,0006 \cdot 10^{-6}.\end{aligned}$$

Эпоха параметров преобразования 2011,0

Параметры преобразования между системами координат ПЗ-90.11 и WGS-84 (G1150):

$$\begin{aligned}\Delta X &= -0,013 \text{ м}; \omega_X = -0,00230 \text{ ''}; \\ \Delta Y &= +0,106 \text{ м}; \omega_Y = -0,00354 \text{ ''}; \\ \Delta Z &= +0,022 \text{ м}; \omega_Z = -0,00421 \text{ ''}; \\ \chi &= -0,008 \cdot 10^{-6}.\end{aligned}$$

Параметры преобразования между системами координат ПЗ-90.11 и ITRF-2008:

$$\begin{aligned}\Delta X &= -0,003 \text{ м}; \omega_X = -0,000019 \text{ ''}; \\ \Delta Y &= +0,001 \text{ м}; \omega_Y = -0,000042 \text{ ''}; \\ \Delta Z &= 0,000 \text{ м}; \omega_Z = +0,000002 \text{ ''}; \\ \chi &= -0,000 \cdot 10^{-6}.\end{aligned}$$

Эпоха параметров преобразования: 2010,0.

В более современном Специализированном справочнике Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11) [20] параметры преобразования дополнены их средними квадратическими погрешностями, а также приведены параметры преобразования между системами координат ПЗ-90.11 и ITRF-2014:

$$\begin{aligned}\Delta X &= -0,0053 \pm 0,0020 \text{ м}; \\ \omega_X &= -0,000035 \pm 0,000073 \text{ ''}; \\ \Delta Y &= -0,0040 \pm 0,0020 \text{ м}; \\ \omega_Y &= -0,000087 \pm 0,000073 \text{ ''}; \\ \Delta Z &= +0,0032 \pm 0,0020 \text{ м}; \\ \omega_Z &= +0,000036 \pm 0,000090 \text{ ''}; \\ \chi &= -(0,0000 \pm 0,0001) \cdot 10^{-6}.\end{aligned}$$

Эпоха параметров преобразования: 2010,0.

Преобразование координат на заданную эпоху

Так как последние реализации систем координат ПЗ-90, ITRF, WGS-84, ГСК-2011 отличаются повышенной точностью, то перед выполнением преобразования из одной системы координат в другую координаты пунктов должны быть приведены на эпоху вывода параметров преобразования этих систем координат с использованием скоростей изменения координат пунктов V_X, V_Y, V_Z . Координаты любой точки в системе координат новой эпохи $T(X_1, Y_1, Z_1)$, относительно старой $T_0(X, Y, Z)$ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned}X_1 &= X + V_X(T - T_0); \\ Y_1 &= Y + V_Y(T - T_0); \\ Z_1 &= Z + V_Z(T - T_0).\end{aligned}\tag{27}$$

Или в векторном виде $\bar{X}_1 = \bar{X} + \bar{V}_X(T - T_0)$.

Алгоритм учета эпохи параметров преобразования при преобразовании координат из одной системы в другую и примеры использования алгоритма приведены в ГОСТ 32453-2017 ГЛОНАСС. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек [7] и Специализированном справочнике Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11) [20].

Преобразование пространственных геодезических эллипсоидальных координат в плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса-Крюгера и обратно с использованием точно определенных параметров перехода (трехмерное и двумерное преобразование) для эллипсоида Красовского

Для эллипсоида Красовского формулы преобразования геодезических координат B, L в плоские прямоугольные x, y и обратно приведены в многочисленной научной, учебной, справочной и нормативной литературе, например «Координаты Гаусса-Крюгера на эллипсоиде вращения» [92], «Курс сфероидической геодезии» [17], «Программирование геодезических задач на языке БЕЙСИК» [72], «Уравнивание государственной геодезической сети» [41], «Геодезическая система координат 2011 года» [24] и др.

Но лучше использовать стандартные формулы, приведенные в ГОСТ 32453-2017 Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек [7] и Специализированном справочнике Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11) [20].

Плоские прямоугольные координаты вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}
 x = & 6367558,4968B - \\
 & -\sin 2B(16002,8900 + 66,9607(\sin B)^2 + 0,3515(\sin B)^4 - \\
 & -l^2(1594561,25 + 5336,535(\sin B)^2 + 26,790(\sin B)^4 + 0,149(\sin B)^6 + \\
 & +l^2(672483,4 - 811219,9(\sin B)^2 + 5420,0(\sin B)^4 - 10,6(\sin B)^6 + \\
 & +l^2(278194 - 830174(\sin B)^2 + 572434(\sin B)^4 - 16010(\sin B)^6 + \\
 & +l^2(109500 - 574700(\sin B)^2 + 863700(\sin B)^4 - 398600(\sin B)^6)))); \\
 y = & (5 + 10n)10^5 + l \cos B(6378245 + 21346,1415(\sin B)^2 + \\
 & +107,1590(\sin B)^4 + 0,5977(\sin B)^6 + \\
 & +l^2(1070204,16 - 2136826,66(\sin B)^2 + 17,98(\sin B)^4 - 11,99(\sin B)^6 + \\
 & +l^2(270806 - 1523417(\sin B)^2 + 1327645(\sin B)^4 - 21701(\sin B)^6 + \\
 & +l^2(79690 - 866190(\sin B)^2 + 1730360(\sin B)^4 - 945460(\sin B)^6))));
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

где x, y - плоские прямоугольные координаты (абсцисса и ордината) определяемой точки в проекции Гаусса-Крюгера, м;

B - геодезическая широта определяемой точки, рад;

l - расстояние от определяемой точки до осевого меридиана зоны, выраженное в радианной мере и вычисляемое по формуле $l = \frac{L-(3+(n-1))}{57,29577951}$;

L - геодезическая долгота определяемой точки, град;

n - номер шестиградусной зоны в проекции Гаусса-Крюгера, вычисляемый по формуле:

$$n = E \left[\frac{L + 6}{6} \right],$$

$E[...]$ - целая часть выражения, заключенного в квадратные скобки.

Преобразование плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса-Крюгера в геодезические координаты на эллипсоиде Красовского выполняется по формулам:

$$\begin{aligned} B &= B_0 + \Delta B; \\ L &= \frac{6(n-0,5)}{57,29577951} + l, \end{aligned} \quad (30)$$

где B, L - геодезические широта и долгота соответственно определяемой точки, рад;

B_0 - геодезическая широта точки, абсцисса которой равна абсциссе x определяемой точки, а ордината равна нулю, рад;

n - номер шестиградусной зоны в проекции Гаусса-Крюгера, вычисляемый по формуле $n = E[y \cdot 10^{-6}]$,

$E[...]$ - целая часть выражения, заключенного в квадратные скобки;

y - ордината определяемой точки в проекции Гаусса-Крюгера, м.

Значения $B_0, \Delta B$ и l вычисляют по следующим формулам:

$$B_0 = \beta + (\sin \beta)^2 (0,00252588685 - 0,00001491860(\sin \beta)^2 + 0,00000011904(\sin \beta)^4); \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \Delta B &= z_0^2 \sin 2B_0 (0,251684631 - 0,003369263(\sin B_0)^2 + \\ &+ 0,00001127(\sin B_0)^4 - z_0^2 (0,10500614 - 0,04559916(\sin B_0)^2 + \\ &+ 0,00228901(\sin B_0)^4 - 0,00002987(\sin B_0)^6 - \\ &- z_0^2 (0,042858 - 0,025318(\sin B_0)^2 + 0,014346(\sin B_0)^4 - \\ &- 0,001264(\sin B_0)^6 - z_0^2 (0,01672 - 0,00630(\sin B_0)^2 + \\ &+ 0,01188(\sin B_0)^4 - 0,00328(\sin B_0)^6))))); \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} l &= z_0 (1 - 0,0033467108(\sin B_0)^2 - \\ &- 0,0000056002(\sin B_0)^4 - 0,000000187(\sin B_0)^6 - \\ &- z_0^2 (0,16778975 + 0,16273586(\sin B_0)^2 - \\ &- 0,000052490(\sin B_0)^4 - 0,00000846(\sin B_0)^6 - \\ &- z_0^2 (0,0420025 + 0,1487407(\sin B_0)^2 + 0,0059420(\sin B_0)^4 - \\ &- 0,0000150(\sin B_0)^6 - -z_0^2 (0,01225 + 0,09477(\sin B_0)^2 + \\ &+ 0,03282(\sin B_0)^4 - 0,00034(\sin B_0)^6 - -z_0^2 (0,0038 + \\ &+ 0,0524(\sin B_0)^2 + 0,0482(\sin B_0)^4 - 0,0032(\sin B_0)^6))))); \end{aligned} \quad (33)$$

где β - вспомогательная величина, вычисляемая по формуле $\beta = \frac{x}{6367558,4968}$;

z_0 - вспомогательная величина, вычисляемая по формуле $z_0 = \frac{y - (10n+5)10^5}{6378245 \cos B_0}$;

x, y - абсцисса и ордината определяемой точки в проекции Гаусса-Крюгера соответственно, м.

Погрешность преобразования координат по приведенным формулам составляет не более 0,001 м.

Преобразование пространственных геодезических эллипсоидальных координат в плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса-Крюгера и обратно с использованием точно определенных параметров перехода (трехмерное и двумерное преобразование) для произвольного эллипсоида

Формулы преобразования геодезических эллипсоидальных координат B, L в плоские прямоугольные x, y в проекции Гаусса-Крюгера и обратно для произвольного эллипсоида приведены в Специализированном справочнике Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11) [20]. Преобразование с погрешностью не более 0,001 м выполняется по следующему алгоритму (для шестиградусной зоны).

Номер зоны и осевой меридиан определяются по формулам:

$$n = E \left[6 + L \frac{180}{\pi} / 6 \right],$$

$$L_0 = (6n - 3) \frac{\pi}{180},$$

где n - номер зоны;

$E[...]$ - целая часть выражения, заключенного в квадратные скобки;

$\pi = 3,14159265359$.

Разность долгот l заданной точки и осевого меридиана зоны равна $l = L - L_0$.

Плоские прямоугольные координаты x, y в проекции Гаусса-Крюгера вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x &= S + a_2 l^2 + a_4 l^4 + a_6 l^6 + a_8 l^8 \\ y &= a_1 l + a_3 l^3 + a_5 l^5 + a_7 l^7 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

где S - начальное значение абсциссы, м,

a и b - большая и малая полуоси эллипсоида, м,

a_1, a_2, a_3, \dots - коэффициенты.

Вычисление S и коэффициентов a_1, a_2, a_3, \dots осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned} S &= \frac{a}{1+k} \left(\left(1 + \frac{k^2}{4} + \frac{k^4}{64} \right) B - \right. \\ &\left. - \left(\frac{3}{2} k - \frac{3}{16} k^3 \right) \sin 2B + \left(\frac{15}{16} k^2 - \frac{15}{16} k^4 \right) \sin 4B - \left(\frac{35}{48} k \sin 6B \right) \right); \\ k &= \frac{a-b}{a+b}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= N \cos B ; \\
a_2 &= \frac{1}{2} N \sin B \cos B ; \\
a_3 &= \frac{1}{6} N (\cos B)^3 (1 - (\tan B)^2 + \eta^2) ; \\
a_4 &= \frac{1}{24} N \sin B (\cos B)^3 (5 - (\tan B)^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) ; \\
a_5 &= \frac{1}{120} N (\cos B)^5 (5 - 18(\tan B)^2 + (\tan B)^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 (\tan B)^2) ; \\
a_6 &= \frac{1}{720} N \sin B (\cos B)^5 (61 - 58(\tan B)^2 + (\tan B)^4 + 270\eta^2 - 330\eta^2 (\tan B)^2) ; \\
a_7 &= \frac{1}{5040} N (\cos B)^7 (61 - 479(\tan B)^2 + 179(\tan B)^4 - (\tan B)^6) ; \\
a_8 &= \frac{1}{40320} N \sin B (\cos B)^7 (1385 - 3111(\tan B)^2 + 543(\tan B)^4 - (\tan B)^6) ,
\end{aligned}$$

где B - геодезическая широта заданной точки, рад,

N - радиус кривизны первого вертикала, м, определяемый по формуле

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

e^2 - квадрат эксцентриситета эллипсоида,

$\eta = e' \cos B$,

e' - второй эксцентриситет эллипсоида.

Условная ордината y' вычисляется по формуле:

$$y' = y + (5 + 10n)10^5 .$$

Преобразование координат из одной плоской прямоугольной системы координат в другую аналогичную в проекции Гаусса-Крюгера с использованием точно определенных параметров перехода (двумерное преобразование) для общего эллипсоида

В большинстве случаев для преобразования координат из одной плоской прямоугольной системы координат в другую аналогичную в проекции Гаусса-Крюгера на общем эллипсоиде можно воспользоваться последовательным преобразованием плоских прямоугольных координат в пространственные геодезические эллипсоидальные координаты, а затем, изменив положение осевого меридиана, преобразовать пространственные геодезические эллипсоидальные координаты в новую плоскую прямоугольную систему координат.

Но бывают случаи, когда новая система плоских прямоугольных координат имеет разворот осей, смещение начала и отличающуюся поверхность относимости. Это характерно для местных систем координат на локальной территории.

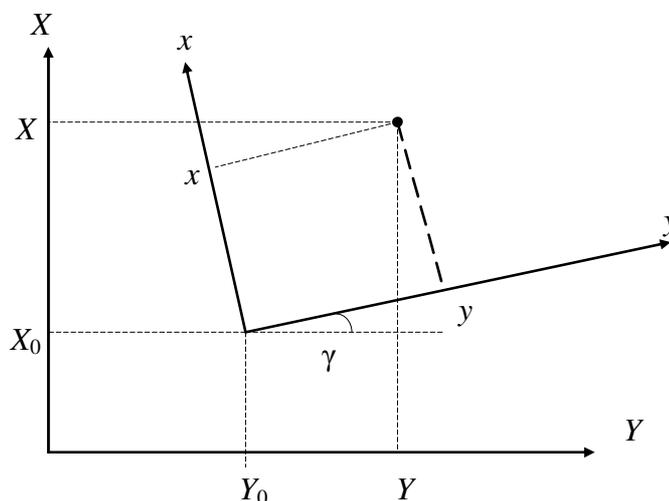


Рис. 27. Двумерное преобразование координатных систем

Преобразование в такой ситуации с погрешностью не более 0,001 м может быть выполнено по следующим формулам (для шестиградусной зоны) [80]:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + \Delta X \left(1 + \frac{H_0}{N_0}\right) \cos \gamma + \Delta Y \left(1 + \frac{H_0}{N_0}\right) \sin \gamma, \\ y &= y_0 + \Delta Y \left(1 + \frac{H_0}{N_0}\right) \cos \gamma - \Delta X \left(1 + \frac{H_0}{N_0}\right) \sin \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

$$f'' = \frac{1}{2R_0^2},$$

X, Y – координаты пункта в исходной плоской системе координат,

X_0, Y_0 – координаты начала новой плоской системы координат в исходной плоской системе координат,

x, y – координаты пункта в новой плоской системе координат,

x_0, y_0 – координаты начала новой плоской системы координат в новой плоской системе координат,

N_0 – радиус кривизны первого вертикала в точке начала новой плоской системы координат $N_0 = \sqrt{a(1 - e^2(\sin B)^2)}$,

R_0 – средний радиус кривизны в точке начала новой плоской системы координат,

γ – угол поворота осевого меридиана новой системы координат.

Одномерное преобразование линии из одной системы координат в другую является частным случаем трех- и двумерного преобразования, и достаточно распространенной геодезической задачей как в классической, так и в спутниковой геодезии. Преобразование в данном случае представляется как правило в виде редуцирования базисных линий. Задача редуцирования базисных линий может быть решена достаточно строго на основе знания точного значения длины базисной линии, измеренной спутниковой системой на физической поверхности Земли, точных параметров системы координат, в которую редуцируется базисная линия, и

приближенных координат концов линии в этой системе координат, определенных одним из вышерассмотренных методов.

Так, например, при одномерном преобразовании линий, измеренных на физической поверхности Земли, в плоскую систему координат в проекции Гаусса-Крюгера, решается классическая редуционная задача высшей геодезии [2].

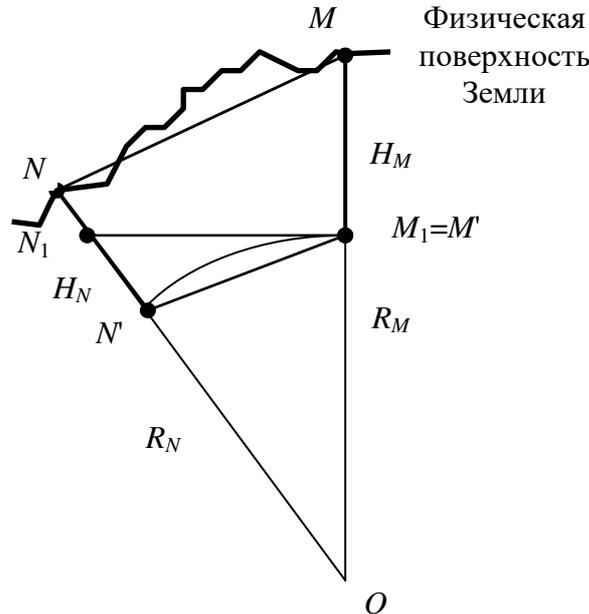


Рис. 28. Одномерное преобразование базисных линий

Переход от длины линии MN , измеренной на физической поверхности Земли к длине линии M_1N_1 , редуцированной в систему плоских координат в проекции Гаусса-Крюгера осуществляется тремя приближениями:

1) введение поправок за наклон линии, например, по формуле:

$$\Delta D_h = -\frac{h^2}{2D} - \frac{h^4}{8D^3}, \quad (36)$$

где $h = H_M - H_N$;

D - длина линии между точками M и N ;

2) редуцирование на поверхность эллипсоида, например, по формуле:

$$\Delta D_R = -\frac{H_m}{R} D + \frac{H_m^2}{R^2} D + \frac{D^3}{24R^2}, \quad (37)$$

где $H_m = \frac{H_M + H_N}{2}$;

R - радиус кривизны нормального сечения между точками M и N ;

3) редуцирование с поверхности эллипсоида на плоскость системы координат в проекции Гаусса-Крюгера по формуле:

$$\Delta D_{ГК} = \frac{y_m^2}{2R} D + \frac{y_m^4}{24R^4} D + \frac{\Delta y^2}{24R^2}, \quad (38)$$

где:

$$y_m = \frac{y_M + y_N}{2};$$

$$\Delta y = y_M - y_N.$$

7. Системы высот

Изложение теории высот в гравитационном поле Земли известный отечественный ученый-гравиметрист, профессор кафедры высшей геодезии МИИГАиК Александр Павлович Юзефович (1938–2019) начинал со слов: «Кто знает, что такое нормальная высота, того не сократят на работе». Это и неудивительно, ведь строгое изложение теории высот в специализированной литературе трудоемко и сопряжено с изучением смежных вопросов теории фигуры Земли. Изучать теорию высот в отрыве от созданной выдающимся геодезистом и геофизиком, членом-корреспондентом Академии наук СССР Михаилом Сергеевичем Молоденским теории фигуры Земли затруднительно, поскольку нормальная высота представляет собой один из ее главных элементов.

Для простоты изложения системы высот можно начинать с наиболее практического бытового понимания «выше–ниже»: говоря о разности точек по высоте, мы всегда имеем в виду течение жидкости или движение однородного шарика под влиянием потенциала поля силы тяжести из области с меньшим потенциалом в область большего потенциала. Так разделяются понятия «верх» и «низ»; иначе говоря, высота в физическом смысле – это не просто «вертикальная длина». Но приращения потенциала пропорциональны превышениям, измеряемым в линейной мере, лишь на ограниченных участках.

Наиболее точным методом измерения превышений пока остается геометрическое нивелирование. В 1938 году в своей статье «О современной постановке высокоточного и точного нивелирования» Феодосий Николаевич Красовский писал, что высокоточное нивелирование должно обеспечивать определение разностей уровней морей и океанов, выяснение вековых движений суши, изучение вертикальных смещений земной поверхности в некоторых районах, не связанных с вековыми движениями суши, в том числе смещений, вызванных землетрясениями, и изучение деформаций уровенной поверхности, вызываемых перемещениями подземных масс.

Оно не лишено недостатков. При геометрическом нивелировании «из середины» принципиально неустранимые проблемы – это накопление ошибок отсчитывания с ростом числа станций (что критично в горах) и прямолинейность визирного луча, тогда как уровенная поверхность имеет кривизну. При работах на суше происходит плавный переход с одной уровенной поверхности на другую. Поскольку удаленные уровенные поверхности на разной высоте имеют различную кривизну, они не параллельны и не подобны, то сумма превышений по замкнутому ходу в общем случае будет ненулевой. По этой же причине сумма превышений между двумя реперами будет различной вдоль разных путей нивелирования. Здесь мы подходим к необходимости введения системы физических высот, где такие неопределенности устранены.

Принципы определения высоты в гравитационном поле

В гравитационном поле под высотой h понимают расстояние между уровенными поверхностями, т.е. отрезок 1–2 силовой линии (рис. 29). Расстояние между уровенными поверхностями $W = W_1$ и $W = W_2$, проходящими через точки 1

и 2, прямо пропорционально разности потенциалов $W_2 - W_1$ и обратно пропорционально среднему значению g_m силы тяжести вдоль силовой линии 1–2:

$$h = -\frac{W_2 - W_1}{g_m}. \quad (39)$$

Знак «минус» в формуле означает, что направление счета высот противоположно направлению силы тяжести. Сила тяжести является градиентом потенциала и направлена в сторону его возрастания, следовательно, в точке 1 потенциал больше, чем в точке 2, и разность $W_2 - W_1$ отрицательна. А высота точки 2 над точкой 1 на рис. 28 положительна. Сила тяжести на уровне поверхности изменяется, поэтому уровенные поверхности не параллельны, и расстояние h при перемещении точек 1–2 вдоль уровенных поверхностей неодинаково.

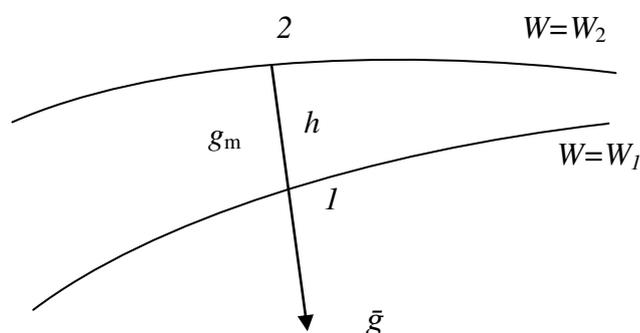


Рис. 29. Определение высоты в гравитационном поле

Расстояния h_1 и h_2 между уровенными поверхностями, проходящими через точки 1 и 2 на физической поверхности Земли, различны (рис. 30).

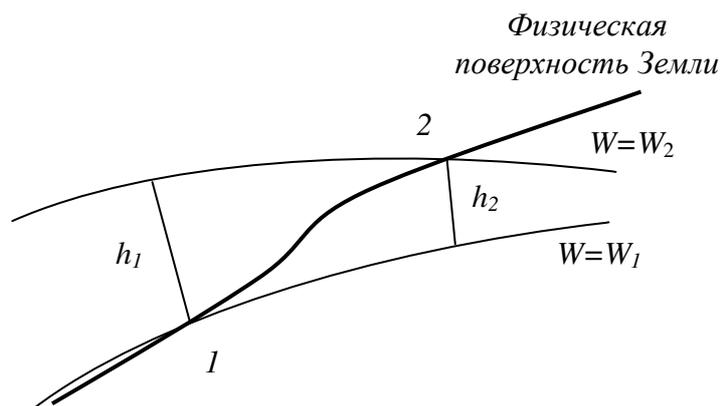


Рис. 30. Расстояние между уровенными поверхностями

При геометрическом нивелировании поскольку расстояние между рейками невелико и, как правило, не превышает 100–150 м, кривизной уровенных поверхностей пренебрегают и считают их плоскостями, параллельными горизонтальной плоскости, проходящей через ось нивелира. В этом случае определение нивелирного превышения на станции нивелирного хода выполняют в однородном гравитационном поле, в котором сила постоянна по величине и направлению, а уровенными поверхностями являются горизонтальные плоскости. При перемещении по поверхности Земли положение горизонтальной плоскости от одной станции к другой изменяется, и превышения Δh по ходу нивелирования зависят от пути нивелирования. Поэтому сумма нивелирных превышений будет зависеть от положения нивелирной линии, и в замкнутом полигоне не равна нулю. Теоретическую сумму превышений f в замкнутом нивелирном полигоне можно определить по формуле:

$$f = \sum \Delta h = -\frac{1}{g_0} \sum (g_m - g_0) \Delta h, \quad (40)$$

где Δh – превышение по секции нивелирного хода, g_m – среднее по секции значение силы тяжести, g_0 – среднее по полигону значение силы тяжести.

В каждой нивелирной сети измерение превышений начинают от исходного пункта O , через который проходит уровенная поверхность $W = W_0$, близкая к среднему уровню моря. Потенциал на уровне моря не постоянен и в нивелирных сетях, опирающихся на разные футштоки, значение W_0 различно. Разность $W_0 - W_P$ потенциалов в исходном пункте O счета высот и любой точке P называют геопотенциальным числом. Из курса геодезической гравиметрии известно, что эту величину получают из совместных измерений превышений dh и силы тяжести g по линии нивелирования:

$$W_0 - W_P = \int_0^P g dh. \quad (41)$$

Основной единицей измерения силы тяжести в гравиметрии является Гал (Gal), названный в честь итальянского физика и астронома Галилео Галилея (1564—1642). В настоящее время гал имеет статус единицы, отличной от СИ, но принятой для использования с единицами СИ в геодезии и геофизике. Положением о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации с 2009 года, гал допущен к использованию без ограничения срока с областью применения гравиметрия.

Гал применяется в гравиметрии при измерениях ускорения свободного падения (силы тяжести) g . Часто применяются также единицы с десятичными множителями – килогал (кГал, kGal), равный 10^3 Гал, миллигал (мГал, mGal), равный 10^{-3} Гал, и микрогал (мкГал, μ Gal), равный 10^{-6} Гал.

Стандартное (нормальное) значение $g = 980,665$ Гал.

Среднее значение g на поверхности Земли равно 979,7 Гал.

Величины вариаций g :

Изменение от полюса к экватору за счёт центробежной силы - 3,4 Гал;

Изменение от полюса к экватору за счёт сплюснутости Земли - 1,8 Гал;

Максимальная амплитуда лунно-солнечных возмущений - 0,24 мГал.

Геопотенциальные числа измеряются в Гал·м.

Очень приближенно можно считать, что геопотенциальное число равно высоте в метрах умноженной на ускорение силы тяжести. Так для горы Эльбрус высота равна 5642 м, приближенное геопотенциальное число 5527 кГал·м, для пика Топографов высота 3089 м, приближенное геопотенциальное число 3026 кГал·м, для горы Кашина высота 1425 м, приближенное геопотенциальное число 1396 кГал·м.

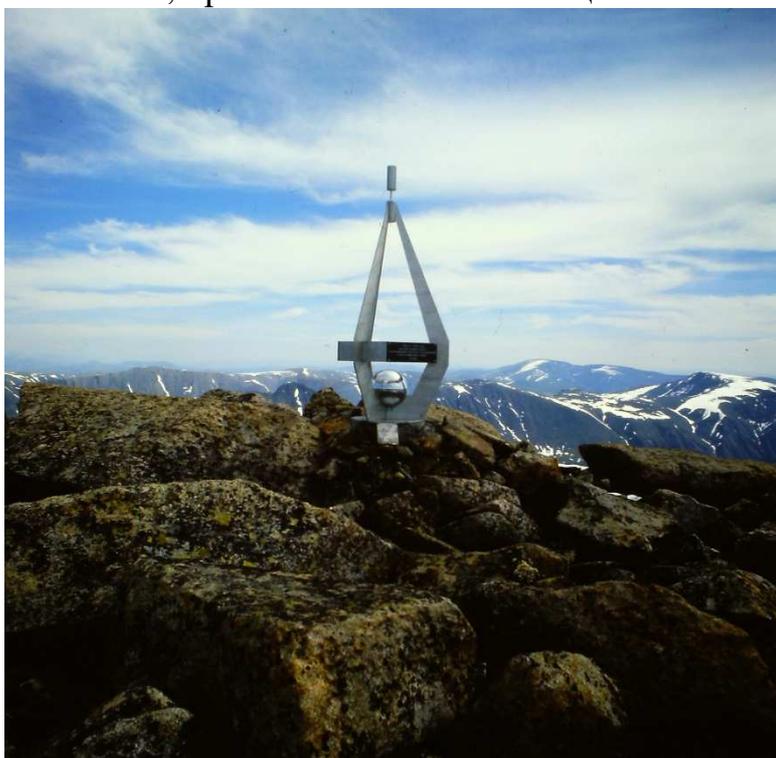


Рис. 31. Памятный знак на пике Топографов

При перемещении по уровенной поверхности $W = W_p = const$ геопотенциальное число постоянно, а работа по перемещению равно нулю. Нам легче идти от точки с меньшим потенциалом к большему, т.е. от точки с большим

геопотенциальным числом к меньшему. Вода в реках всегда течет в направлении уменьшения геопотенциального числа, а уровень воды в водоемах совпадает с поверхностью равных геопотенциальных чисел.

Геодезическая, ортометрическая, нормальная и динамическая высоты

ГОСТ «Геодезия. Термины и определения» [6] в 1976 году установил в качестве применяемых в науке, технике и производстве терминов и определений основных понятий в области геодезии четыре определения высоты: геодезическая, ортометрическая, нормальная и динамическая. Каждый термин приведен на четырех языках: русском, немецком, английском и французском. При этом только два вида высот определены через геопотенциальные числа (величины).

<p>27. Геодезическая высота D. Geodätische Höhe E. Geodetic height F. Altitude géodésiques</p>	<p>Высота точки над поверхностью земного эллипсоида</p>
<p>28. Ортометрическая высота D. Orthometrische Höhe Meereshöhe E. Orthometric height F. Cote orthométrique Altitude orthométrique</p>	<p>Высота точки над поверхностью геоида</p>
<p>29. Нормальная высота D. Normalhöhe E. Normal height F. Altitude normale</p>	<p>Величина, численно равная отношению геопотенциальной величины в данной точке к среднему значению нормальной силы тяжести Земли по отрезку, отложенному от поверхности земного эллипсоида</p>
<p>30. Динамическая высота D. Dynamische Höhe E. Dynamic height F. Cote dynamique Altitude dynamique</p>	<p>Величина, численно равная отношению геопотенциальной величины в данной точке к некоторому постоянному значению ускорения силы тяжести Земли</p>

Геодезическая высота уже рассматривалась в системе геодезических эллипсоидальных координат - трех величин, две из которых характеризуют направление нормали к поверхности земного эллипсоида в данной точке пространства относительно плоскостей его экватора и начального меридиана, а третья является высотой точки над поверхностью земного эллипсоида.

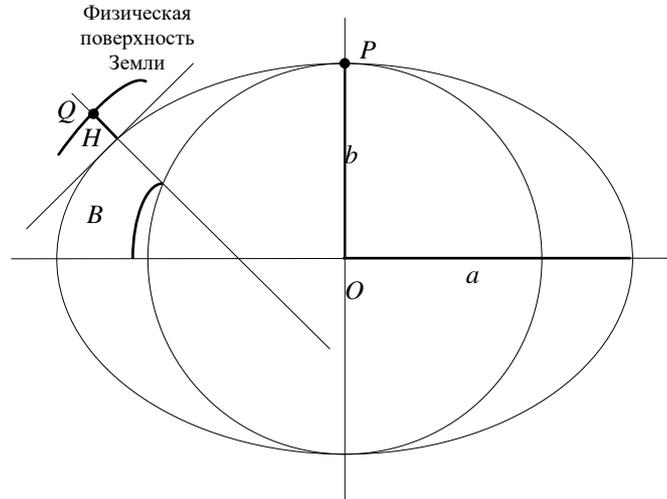


Рис. 32. Геодезическая высота в эллипсоидальной системе координат

Геопотенциальное число также можно рассматривать как координату точки, определяющую вместе с широтой и долготой ее положение в пространстве. Его можно выразить в линейных единицах, разделив на постоянное значение C силы тяжести:

$$H^d = \frac{W_0 - W_P}{C}, \quad (42)$$

т.е. предполагая поле силы тяжести однородным. Отношение H^d называют **динамической высотой**. В качестве постоянной C используют разные значения, принимая ее равной 1 кГал, значению нормальной силы тяжести на эллипсоиде на широте 45° $\gamma_0(45)$, среднему значению силы тяжести в отдельной области $g_{\text{ср}}$. Однако, несмотря на формальное выражение динамической высоты в метрах, эта высота геометрического смысла не имеет и по-прежнему выражает работу, которую нужно выполнить в гравитационном поле при перемещении от исходной уровенной поверхности $W = W_0$ до данной точки. Эти высоты используют в океанографических исследованиях, при решении энергетических задач - гидростатическом нивелировании, проектировании водохранилищ, продуктопроводов и т.п.

Для вычисления высоты над исходной уровенной поверхностью $W = W_0$ геопотенциальное число нужно разделить на среднее значение g_m силы тяжести вдоль отрезка 1–2 силовой линии (рис. 33):

$$H^g = \frac{W_0 - W_P}{g_m} = \frac{1}{g_m} \int g dh. \quad (43)$$

Высота H^g называется высотой над уровнем моря или **ортометрической высотой**. Чтобы вычислить значение g_m , нужно знать плотность пород вдоль силовой линии или измерять силу тяжести внутри Земли. Поэтому ортометрическую высоту нельзя найти по измерениям только на поверхности Земли.

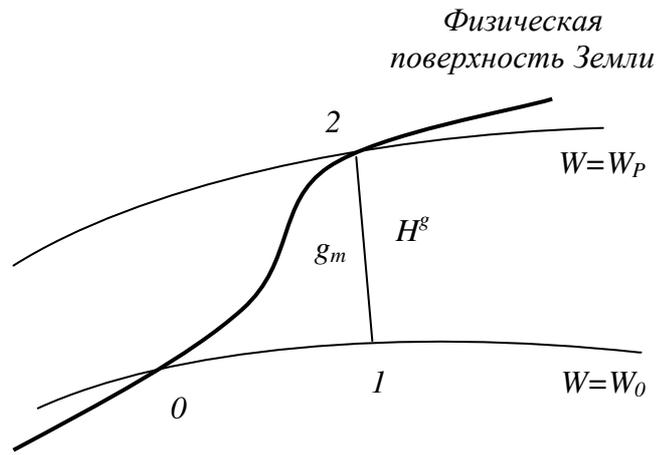


Рис. 33. Ортометрическая высота

Для получения высоты по результатам измерений только на поверхности Земли и во внешнем пространстве геопотенциальное число рассматривают в нормальном поле, и находят в нормальном поле высоту точки, для которой разность $U_0 - U_2^Y$ нормальных потенциалов относительно отсчетного эллипсоида $U = U_0$ равна геопотенциальному числу $U_0 - U_2^Y = W_0 - W_2$ (тождество Молоденского). Используя это условие и формулу определения высоты, для нормальной высоты H^Y находим:

$$H^Y = \frac{U_0 - U_2^Y}{\gamma_m} = \frac{W_0 - W_2}{\gamma_m} = \frac{1}{\gamma_m} \int g dh. \quad (44)$$

Представим потенциал W_P суммой нормального U и аномального T потенциалов $W_P = U_P + T_P$, тогда

$$H^Y = \frac{U_0 - U_P - T_P}{\gamma_m} = \frac{U_0 - U_P}{\gamma_m} - \frac{T_P}{\gamma_m}. \quad (45)$$

Если не учитывать кривизну нормальной силовой линии, первый член правой части этого равенства равен геодезической высоте H , а второй определяет аномалию высоты ζ . Таким образом, нормальная высота равна

$$H^Y = H - \zeta. \quad (46)$$

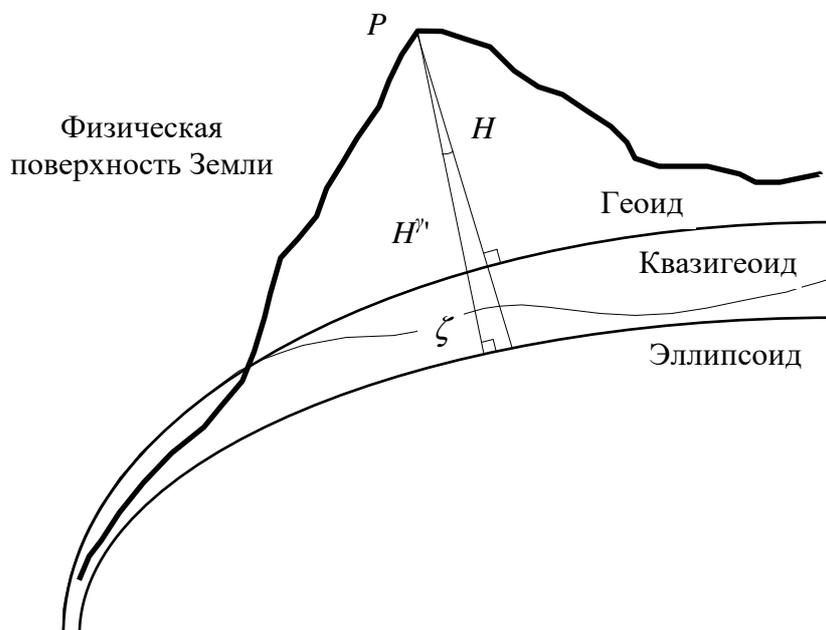


Рис. 34. К определению нормальной высоты

При развитии системы геодезического обеспечения традиционными методами геодезических измерений (до широкого применения спутниковых технологий) координатное, высотное и гравиметрическое обеспечение развивались достаточно обособленно друг от друга. Это было связано с тем, что существовавшие тогда методы и средства геодезических измерений в целях развития планового, высотного и гравиметрического обеспечения обуславливали необходимость развития плановых, нивелирных и гравиметрических сетей в различных местах расположения геодезических пунктов и при различных конструкциях самих геодезических пунктов. Развитие гравиметрических технологий и современные спутниковые технологии геодезических измерений обеспечивают возможность объединения геодезических опорных сетей в единую совокупность геодезических пунктов, обеспечивающих развитие и взаимосвязь всех трёх составляющих общей системы геодезического обеспечения, как единой геодезической категории. Тем не менее, до настоящего времени в развитии системы высотного обеспечения основным средством создания высокоточной высотной основы остаётся метод геометрического нивелирования.

Исторические сведения о нивелировании

История нивелирных работ в России началась в середине XIX в. Начиная с 40-х годов XIX в., решение вопросов, связанных с созданием на территории России высотной опорной сети, отметки которой исчислялись бы от одного общего уровня, диктовалось широко развитыми к тому времени топографическими съёмками Военно-топографического отдела (ВТО). Эти же вопросы неоднократно поднимались русскими учеными. Так, например, в 1862 г. Совет Русского географического общества (РГО), обсуждая проект О. В. Струве (1819—1905 гг.) о создании опорной нивелирной сети в Европейской России, признал необходимость организации таких работ как одну из важнейших задач картографирования страны. В связи с появлением способа изображения рельефа горизонталями, сменившего

штриховой способ, более высокими стали требования к точности определения высот. Это вызвало необходимость повышения точности высотной опорной сети страны и отнесение ее к одному и тому же исходному уровню [91].

История развития нивелирных работ неоднократно рассматривалась в геодезической литературе, в частности в сборнике трудов ЦНИИГАиК 1956 года «Высокоточное нивелирование» [63], а также в современных публикациях «Государственная нивелирная сеть (главная высотная основа)» [62], «История создания и развития нивелирной сети России» [1]. Наиболее полно этот вопрос раскрыт в сборнике статей «О нивелирной сети СССР (К 100-летию создания высокоточной нивелирной сети)» [19], подготовленном по материалам докладов научно-технической конференции, организованной 12 декабря 1977 г. Главным управлением геодезии и картографии при Совете Министров СССР (ГУГК при СМ СССР), Всесоюзным астрономо-геодезическим обществом при Академии наук СССР (ВАГО) и научно-техническим обществом «Горное» (НТГО) – предшественником Российского общества геодезии, картографии и землеустройства.

В 1871–1872 гг. геодезисты Военно-топографического отдела (ВТО) - капитан Н. Я. Цингер и поручик М. А. Савицкий выполняли точное нивелирование вдоль Балтийской и Санкт-Петербургско-Варшавской железных дорог. Осуществление этого проекта было начато Н. Я. Цингером (1842-1918 гг.) в июне 1871 г. проложением по только что построенной Балтийской железной дороге нивелир-теодолитных ходов, идея которых была предложена бывшим начальником Военно-топографического отдела (ВТО) Э. И. Форшем (1828-1896 гг.). Для этих работ им был сконструирован особый прибор нивелир-теодолит, позволяющий измерять горизонтальные углы с точностью 5-10", как обыкновенным теодолитом, а расстояния и превышения при помощи вертикальных углов, определяемых с точностью 2-4" по вертикальному сектору (вместо полного круга).



Рис. 35. Нивелир-теодолит

Проложенные в 1871-1872 гг. Н. Я. Цингером нивелир-теодолитные ходы по Балтийской и частично по Санкт-Петербургско-Варшавской дороге от Динабурга (Двинск) до станции Лапы позволили ему установить точность определения высот и расстояний этим способом нивелирования. Точность таких ходов по его исследованиям характеризуется средней квадратической случайной погрешностью на 1 км хода порядка ± 10 мм [91] при расстояниях от нивелир-теодолита до рек 210 м, что не превышало точности современного нивелирования IV класса.

Невысокая точность нивелир-теодолитных ходов, выполненных в 1871-1872 гг., послужила основанием для отказа от создания на территории России высотной сети проложением таких ходов и к переходу в дальнейшем к определению высот марок геометрическим способом при помощи нивелира, позволяющего получать горизонтальный луч визирования.

Отказ КВТ от нивелир-теодолитных работ и переход к геометрическому способу нивелирования для создания высотной опорной сети в стране соответствовал решению Международной геодезической ассоциации, которая еще в 1864 г. рекомендовала всем государствам, выполняющим геодезические работы в общегосударственных интересах, определять высоту опорной сети геометрическим способом со средней погрешностью $\pm(3-5)$ мм на 1 км хода. Такие требования к постановке нивелирных работ предусматривали использование их результатов не только для целей картографирования, но и в решении научных проблем, и в первую очередь для определения разностей уровней морей и океанов и изучения вертикальных движений земной коры [91].

В 1873 г. военные геодезисты А. М. Ленчевский, Н. А. Котовский и А. П. Федотов начали геометрическое нивелирование между Петербургом и Москвой. А. П. Федотов для сравнения работу проводил нивелир-теодолитом. Нивелирование линии закончилось в 1876 г. Точность геометрического нивелирования была невысокой и характеризовалась случайной погрешностью $\pm 6,2$ мм на 1 км хода, а систематической $\pm 0,9$ мм. И все же по сравнению с нивелир-теодолитными ходами это были более точные работы.

В работе «Высокоточное нивелирование» [63] на основе использования национальных отчетов, представленных на XV, XVI и XVII Генеральных ассамблеях Международного геодезического и геофизического союза (МГГС), состоявшихся в 1971 г. в Москве, в 1975 г. в Гренобле и в 1979 г. в Канберре выполнен обзор национальных высотных сетей того времени.

Высотные сети методом геометрического нивелирования начали создавать после решения, принятого Международной геодезической ассоциацией в 1864 г. Геометрическое нивелирование должно было выполняться с вероятнейшей погрешностью менее 3 мм/км, при этом высоты в каждой стране должны быть отнесены к одному исходному пункту. В последующие годы требования к точности геометрического нивелирования повышались.

Первыми в 1865 г. начали создавать высотную сеть этим методом геодезисты Швейцарии и Саксонии, затем в 1867 г. - Пруссии, в 1872 г. - Испании, в 1873 г. - России и Австро-Венгрии, в 1876 г. - Италии, в 1882 г. - Португалии, в 1884 г. - Франции (если, не считать нивелирную сеть 1857-1864 гг., выполненную с

погрешностью 10 мм/км) и Дании, в 1886 г. - Швеции. В США работы по геометрическому нивелированию начались только в 1890 г.

К 80-м годам XX столетия практически во всех странах мира были созданы государственные высотные сети (табл. 17) [63].

Таблица 17

Страна	Площадь, тыс. кв. км	Длина линий, тыс. км	Годы создания
Австралия	7700	161,0*	1950—1970
Аргентина	2777	61,6*	1944—1974
Афганистан	655	6,0*	На 1970
Болгария	111	6,0*****	1958—1978
Боливия	1099	14,3	1949—1967
Бразилия	8512	98,0*	На 1970
Венгрия	93	3,8*****	1974—1976
ГДР	108	6,0***	1974—1976
Индия	3281	35,2**	1914—1978
Иран	1648	13,0	На 1971
Испания	505	11,3**	1925—1975
Канада	9974	95,0*	На 1973
Китай	9597	~45	На 1969
Ливия	1760	7,1	На 1974
Нидерланды	37	4,6***	1926—1940
-	37	2,0*****	1971—1979
Нигерия	924	13,0*	На 1974
Польша	313	10,6*****	1971—1979
Саудовская Аравия	2400	15,0*	На 1970
США	9364	855*	1890—1974
ФРГ	248	16,2**	1947—1962
Финляндия	337	8,0**	1935—1976
Франция	552	14,0***	1962—1969
Югославия	256	10,3**	1946—1966

* Суммарная длина линий нивелирования I и II классов.

** Второе нивелирование.

*** Третье нивелирование.

**** Четвертое нивелирование.

***** Высотная сеть создана методом гидростатического нивелирования.

С 1877 по 1880 гг. работы по нивелированию в стране не проводились в связи с тем, что Военно-топографический отдел (ВТО) оказывал помощь братской Болгарии, и возобновились они только в 1881 г. Возобновление работ по геометрическому нивелированию не было механическим продолжением работ, начатых в 1873 г., это был новый этап в развитии нивелирной сети страны. Исходя из просьб различных ведомств и крупнейших ученых страны, Военно-топографический отдел Главного штаба (ВТО) в разработал общую программу и новую инструкцию для производства точного геометрического нивелирования в России под названием «Геометрические нивелировки Военно-топографического отдела Главного штаба, возобновленные в 1881 году» [19].

Эта была первая программа развития и построения нивелирной сети в нашей стране. Она исходила не только из необходимости решения практических задач, но

и ставила перед собой научные проблемы, определив основные направления развития точного нивелирования на несколько десятилетий вперед. Программа предусматривала решение таких научно-технических задач, как определение уровней Балтийского, Черного и Азовского морей, связь нивелирной сети России через прусские и австро-венгерские нивелировки с Северным и Средиземным морями, установление 3 - 4 особых марок и принятие мер для их сохранения, с тем, чтобы они «могли послужить для позднейших исследований поднятий континента».

При составлении программы и инструкции для геометрического нивелирования учитывались рекомендации Международной геодезической ассоциации (МГА) [60].

Схема проекта нивелирования 1881 г. была следующей:

1. Линии нивелирования прокладывались от Петербурга на запад по обоим берегам Финского залива. Южная ветвь через Ригу, по побережью Балтийского моря должна была связать русские, немецкие и голландские линии нивелирования.

2. Кронштадтский футшток по нескольким направлениям связывался с футштоками Черного и Азовского морей, а через австро-венгерскую нивелирную сеть с футштоком Триеста.

В нивелирную сеть включались установленные в 1874 г. на Черном море футштоки в Одессе, Севастополе и Очакове. На Азовском море была запроектирована установка футштоков в Геничевске, Таганроге и Мариуполе, что и было осуществлено соответственно в 1876, 1882, 1887 гг. Всего в нивелирной сети было 11 футштоков [60].

3. Проложенная в 1873-1876 гг. линия нивелирования Петербург - Москва продолжалась в юго-восточном направлении на Рязск - Воронеж - Новочеркасск. От Рязска нивелирная линия продолжалась через Сызрань, Самару до Оренбурга. Западные и восточные линии нивелирования соединялись между собой линиями нивелирования, прокладываемыми в широтном направлении. Всего образовывалось восемь полигонов и одна висячая линия Сызрань - Оренбург. Первую очередь нивелирования протяженностью в 13 752 версты намечалось осуществить в течение 12 лет четырьмя наблюдателями.

Вторая очередь нивелирования должна была связать нивелирную сеть Европейской России с Большой Сибирской нивелировкой, проходящей примерно по 52-й параллели, вдоль будущей транссибирской магистрали, а также предполагала нивелирование по линиям Ростов - Владикавказ - Тифлис, Поти - Тифлис - Баку, Сызрань - Царицын - Астрахань и другим направлениям, предусматривающим определение уровней Черного и Каспийского морей.

С 1881 г. нивелирование стали производить в прямом и обратном направлениях, двумя исполнителями, нивелирами ВТО-I. Они были оснащены трубами с увеличением 30-40 крат, а длина визирного луча составляла 85 метров. Стали применять двухсторонние шашечные рейки, одна из сторон была в делениях сажени. Предъявлялись требования, чтобы погрешность нивелирования на 1 км хода не превышала 3 мм. Но, несмотря на тщательность проведения работ, требования к точности выполнены не были, и погрешности превысили установленные предельные значения: случайные погрешности составили порядка 4,0-4,5 мм, а систематические до 1 мм на 1 км хода.

Проанализировав в 1882-1883 гг. выполненные с 1881 по 1882 гг. работы по нивелированию, Д. Д. Геденов предложил изменить конструкцию нивелира ВТО-I, скрепив уровень с трубой, а не с подставкой (коромыслом). По его предложению Военно-топографический отдел Главного штаба (ВТО) изготовил новый нивелир ВТО-II с ценой деления цилиндрического уровня 2-7" и увеличением зрительной трубы 35-40 крат.

В 1883 г. была утверждена Инструкция для проведения нивелирных работ, которая предусматривала на 1 км хода случайную погрешность не более 3 мм, а систематическую - 0,5 мм. При наблюдениях на станции вводился симметричный во времени порядок отсчетов по рейкам, стали обязательными контрольные вычисления в поле. Методика нивелирования, установленная в 1883 г., применялась до 1913 г., а точность соответствовала заявленной в Инструкции [1, 19].

В 1894 г., согласно намеченному плану, под руководством полковника С. Д. Рыльке было проведено первое уравнивание российской нивелирной сети [1, 19], выполненной в 1871–1893 гг. Был составлен каталог, известный под названием «Каталога Рыльке». Каталог содержал высоты 1 092 марок, укрепленных на линиях нивелирных ходов протяженностью 1 300 км. Точность нивелирования из уравнивания характеризовалась погрешностью не более 3 мм на 1 км хода, а как показала их последующая обработка совместно с нивелировками, проложенными в более позднее время, средние поправки на 1 км хода составили 0,28 мм, при максимальных поправках на отдельных участках 1,5—2,7 мм. Первая нивелирная сеть страны 1871-1893 гг. сохраняла свое значение до конца 40-х годов XX столетия, т. е. до времени полного перекрытия ее новыми нивелирными ходами [60].

Впервые было установлено, что уровень Черного, Азовского, Адриатического и Северного морей ниже уровня Балтийского моря. Понижение Черноморско-Азовского уровня по отношению к уровню Балтийского моря оказалось равным 0,4 сажени (0,85 м), а уровней Адриатического моря в Триесте и Северного у Амстердама, вычисленных через Среднеевропейские нивелировки, на 0,32 сажени (0,68 м) и 0,23 сажени (0,49 м) соответственно. Конечно, новейшие данные по абсолютной величине отличаются от полученных в 1894 г., но знак и порядок разности уровней подтверждается.

Эти результаты нивелирных связей уровней морей для С. Д. Рыльке и других ученых-геодезистов того времени были полной неожиданностью. По их представлениям это противоречило теории гравитационного поля Земли и не соответствовало плотностям и солености вод Черного и Балтийского морей. Считая, что уровень Черного моря никак не может быть ниже уровня Балтийского моря, С. Д. Рыльке для вычисления принимает уровни обоих морей одинаковыми и все вычисления проводит от среднего Балтийско-Черноморского уровня.

Балтийско-Черноморская система высот просуществовала до 1934 г., отвечая практическим запросам картографирования страны.

Инструкция 1883 г. действовала до 1913 г. Затем в соответствии с решениями Международной геодезической ассоциации 1912 г., изменившими требования к точности геометрического нивелирования, в 1913 г. была введена новая «Инструкция для нивелировок высокой точности, производимых Корпусом военных топографов». Инструкция 1913 г. была издана только в 1921 г. Предельные значения

погрешностей нивелирования на 1 км хода по Инструкции 1913 г. не должны были превышать для случайной погрешности $\pm 1,5$ мм, а для систематической 0,3 мм.

Технические требования к приборам не изменились, но длина визирного луча сокращалась до 65 м. Первой линией нивелирования «высокой точности», выполненной в соответствии с требованиями Инструкции 1913 г., была линия Петроград-Одесса. Нивелирование линии проводилось с 1913 по 1917 гг.

Военные геодезисты продолжали выполнение высокоточного и точного нивелирования и после 1917 г. Но основные объемы работ по точному и высокоточному нивелированию в стране, начиная с 20-х годов, выполнялись уже Высшим геодезическим управлением (ВГУ), Главным геодезическим управлением (ГГУ), Главным управлением государственной съемки и картографии (ГУГСК), а затем ГУГК при СМ СССР. Преодолев огромные трудности, подразделения ВГУ за первые 5 лет своего существования с 1919 по 1923 г. выполнили 1 750 км высокоточного и точного нивелирования [19].

В целях координации работ Высшего геодезического управления (ВГУ) и Военно-топографического управления (ВТУ) с февраля 1924 г. в стране начало функционировать постоянное «Совещание ответственных работников ВТУ Штаба РККА и ВГУ ВСНХ» (сокращенно «Совещание ВТУ, ВГУ»).

Это совещание в 1924 г. по предложению Ф. Н. Красовского рассмотрело и утвердило «Главные основания составления проекта рядов триангуляции 1 класса и проекта полигонов линий нивелирования высокой точности в пределах территории Европейской части СССР».

В основу проекта нивелирования высокой точности были положены следующие главные требования:

1. Основная сеть высокоточного нивелирования должна состоять из полигонов с периметром 800-1000 км. Полигоны на востоке и юго-востоке России могли превышать указанные размеры.

2. В эту сеть не должны входить прежние нивелирные ходы, выполненные с меньшей точностью по сравнению с точностью, предъявляемой к современному высокоточному нивелированию. При необходимости такие нивелирные ходы должны переделываться.

3. Сеть нивелирных полигонов по возможности должна быть согласована с полигонами триангуляции 1 класса и охватывать всю европейскую часть СССР до Урала.

Для технического руководства при производстве высокоточного нивелирования Высшее геодезическое управление (ВГУ) в 1925 г. ввело новую «Инструкцию по нивелированию высокой точности», составленную при участии и под редакцией Ф. Н. Красовского. Эта инструкция установила для высокоточного нивелирования более высокие требования к точности. Средние квадратические погрешности на 1 км хода не должны были превышать для случайной ± 1 мм, а для систематической $\pm 0,3$ мм. Новые требования полностью соответствовали рекомендациям Международной геодезической ассоциации.

В дальнейшем развитии нивелирной сети страны значительную роль сыграли решения Первого (19-22 апреля 1926 г.) и Второго (11-14 апреля 1927 г.) геодезических совещаний, созванных Геодезическим комитетом Госплана СССР.

Первое геодезическое совещание, уделив большое внимание развитию и приведению в порядок существующей нивелирной сети страны, приняло решение:

- считать нуль Кронштадтского футштока по-прежнему основным нулем всех высот СССР;

- осуществить в самом непродолжительном времени нивелирные связи всех футштоков, расположенных на Белом, Черном, Балтийском морях и Тихом океане;

- провести общее уравнивание нивелирной сети и издать каталоги высот.

Второе геодезическое совещание при Госплане СССР также отметило: «Необходимо отнести высоты в стране к одной и той же точке, в качестве таковой точки принять нуль Кронштадтского футштока» (Геодезист, 1927, № 6) [91].

В его решении отмечалось: «Учитывая большой научный интерес и громадную практическую важность существования медленных колебаний суши, признать своевременным изучение путем повторных нивелировок высокой точности и по возможности повторных триангуляционных работ в тех областях, в которых такие движения можно считать заведомо установленными, например, в Каспийско-Черноморской области и в районе, примыкающем к Финно-Скандинавскому щиту, поручая эту работу авторитетным учреждениям» [91].

В соответствии с решением Второго геодезического совещания в 1933 г. Главным геодезическим управлением (ГГУ) под руководством А. М. Вировца было выполнено новое, второе после 1894 г., уравнивание нивелирной сети страны. Оно включало нивелировки, исполненные с 1875 по 1932 гг., проложенные в европейской части СССР.

В каталог высот марок и реперов высокоточного и точного нивелирования [19] вошли линии общим протяжением 69 450 км; почти половина из них была проложена подразделениями Высшего геодезического управления (ВГУ) и заменившим его Главным геодезическим управлением (ГГУ). Если за период с 1919 по 1924 гг. ВГУ, ГГУ было выполнено всего 1 750 км нивелирования, то с 1925 по 1929 гг. – 13 500 км, а с 1930 по 1934 гг. - 21 100 км.

В уравнивание 1933 г. были включены высокоточные нивелировки, проложенные по 106 линиям. Точность нивелирования по результатам уравнивания характеризовалась следующими поправками на 1 км хода: до 0,1 мм в 69% линий; до 0,2 мм в 17% линий и до 0,5 мм в 14% линий при наибольшей поправке 0,7 мм.

Уровень Черного моря на футштоках Севастополя, Одессы, Феодосии, Новороссийска оказался ниже нуля Кронштадтского футштока на 0,41 м, а Азовского моря — на 0,39 м. Уравнивание 1933 г. не охватывало всю страну. Для Сибири и Дальнего Востока в 1931 г. Военно-топографическим управлением (ВТУ) был составлен «Временный каталог сибирских нивелировок» [60]. Высоты в этом каталоге были вычислены от нуля Кронштадтского футштока. Но вследствие большой разности средних уровней Балтийского моря и Тихого океана (1,873 м) было признано целесообразным на Дальнем Востоке и в Восточной Сибири использовать Тихоокеанскую систему счета высот.

Впоследствии, по мере проложения новых нивелирных линий, к каталогу составлялись дополнения. Важнейшими из них были:

1) первое и второе дополнения нивелирования, выполненного на Украине, в Белоруссии, на Урале и в других районах страны;

2) каталог нивелировок Кавказа, заменивший «Временный каталог высот марок Кавказской нивелирной сети», составленный Н. И. Шлепневым и включивший нивелировки, выполненные на Кавказе до 1915 г. общим протяжением 3,5 тыс. км. Высоты в нем были, вычислены от уровня Черного моря;

3) каталог нивелирования Средней Азии, составленный ВТУ в 1935 г., и др.

В целях быстрее удовлетворения возросших потребностей народного хозяйства в высотной основе, в 1933 г. было принято решение ввести новую классификацию; нивелирование стали делить на высокоточное и точное. Для высокоточного нивелирования снова устанавливались допуски Инструкции 1913-1921 гг. Случайная погрешность на 1 -км хода не более 1,5 мм, систематическая не более 0,3 мм, а для точного нивелирования 2,0 и 0,4 мм соответственно. Таким образом, требования к точности нивелирования по сравнению с Инструкцией 1925 г. снижались.

В 1938 г. Главным управлением государственной съемки и картографии (ГУГСК), заменившим Главное геодезическое управление (ГГУ), была издана новая инструкция по нивелированию, в которой названия «высокоточное» и «точное» заменялись соответственно на нивелирование I и II разрядов. Показатели точности при этом не изменились. Положительным в этой инструкции было то, что линии нивелирования, кроме стенных марок, впервые закреплялись на местности грунтовыми реперами, в том числе, хотя и редко, фундаментальными и даже вековыми.

Государственная система высот

Государственной системы высот 1932 года не было. В соответствии с работой «Нивелирная сеть СССР» [60] результатом уравнивания государственных нивелирных сетей 1933 года был «Каталог высот марок и реперов высокоточного и точного нивелирования, исполненных Главным геодезическим управлением и Управлением военных топографов в Европейской части СССР с 1875 по 1932 гг.» и «Временный каталог высот Сибирских нивелировок с 1901 по 1928 гг.».

Следует отметить несколько моментов, касающихся двух следующих государственных систем высот СССР.

Уравнивание и каталогизация основной нивелирной сети СССР, начатые в 1946 г., были успешно завершены в 1950 г. Уравниванию предшествовала разработка и утверждение 7 апреля 1946 г. нормативного акта большой государственной важности - постановления Совета Министров СССР «О введении единой системы геодезических координат и высот на территории СССР». Согласно этому постановлению, за исходный уровень для вычисления высот на всей территории СССР принималось Балтийское море - нуль Кронштадтского футштока. Вводимая система высот постановлением коллегии ГУГК от 12 августа 1946 г. была названа «Балтийской» и должна была представлять систему ортометрических высот, полученную в результате уравнивания нивелировок I и II классов [19].

Балтийская система высот 1977 года, после очередного цикла уравнивания нивелирной сети страны была введена как система нормальных высот приказом Главного управления геодезии и картографии при Совете Министров СССР (ГУГК при СМ СССР) и Военно-топографического управления Генерального штаба (ВТУ ГШ) от 05 июня 1978 г. № 7/155 «О введении в действие каталога главной высотной

основы СССР». Нормативно-правовых актов по данному вопросу не издавалось [19].

Система высотного обеспечения Российской Федерации

В настоящее время на территории Российской Федерации действует Балтийская система высот 1977 года. До настоящего времени в развитии системы высотного обеспечения основным средством создания высокоточной высотной основы остаётся метод геометрического нивелирования. Государственная нивелирная сеть России разделяется на нивелирные сети I, II, III и IV классов. Государственные нивелирные сети высокоточного нивелирования I и II класса являются основой системы нормальных высот, и получили название главной высотной основы (ГВО). Общая протяжённость сетей нивелирования I и II класса составляет порядка 400 тысяч км. Схема главной высотной основы представлена рис. 36. На основе реперов нивелирования I и II класса развивается сеть государственного нивелирования III и IV класса.

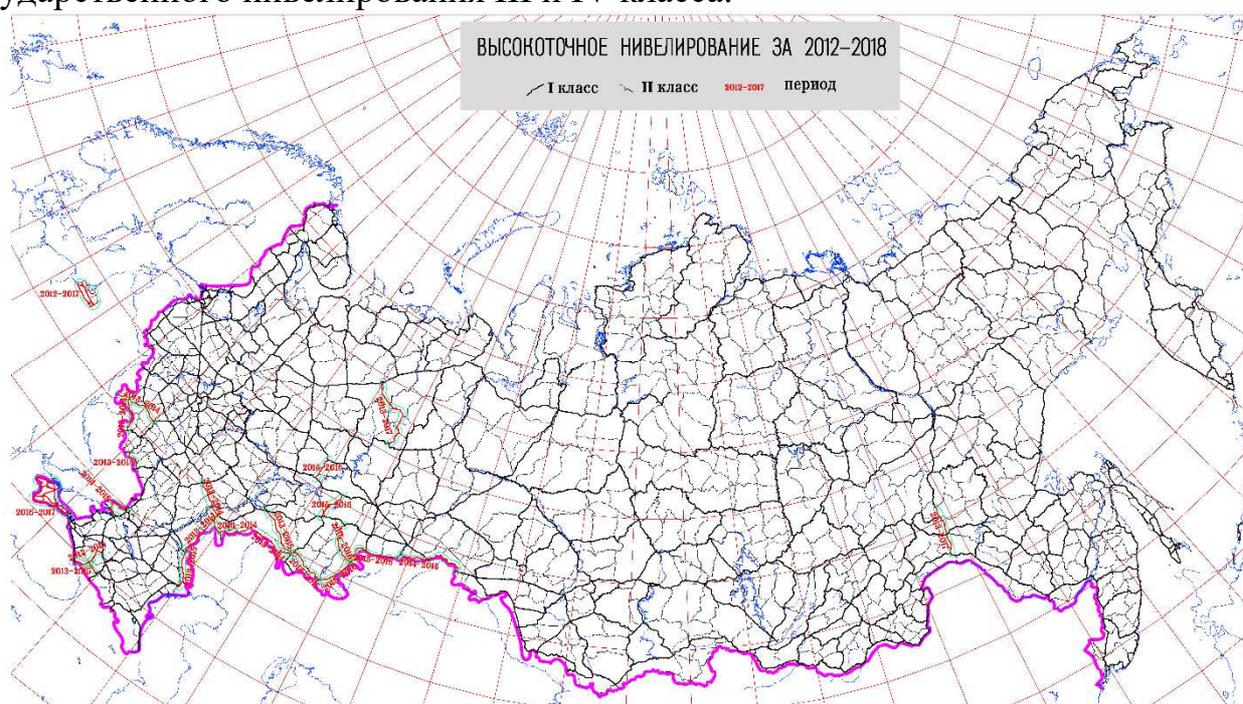


Рис. 36. Схема главной высотной основы России в 2019 г. [90]

При использовании геометрического нивелирования в системе высотного обеспечения нормальные высоты определяются от одного исходного пункта относительными методами передачи высот. За исходный пункт на территории России принят уровневый пост, расположенный в городе Кронштадте (Кронштадтский футшток), в котором средний многолетний уровень Балтийского моря соответствует нулю в значении нормальной высоты. При использовании уровневых постов в качестве исходных пунктов для определения начала счета высот подразумевается совпадение среднего уровня моря в этих пунктах с поверхностью геоида. Таким образом, вся нивелирная сеть огромной протяженности на территории России опирается на один исходный пункт, не имеет внешнего контроля и уравнивается как свободная система.

Главная высотная основа России модернизируется в соответствии с ведомственными Программами модернизации ГВО, которые определяют перечень

линий нивелирования, на которых выполняются повторные измерения, перечень новых линий высокоточного нивелирования. Последние работы по модернизации и развитию ГВО выполнялись по Программе модернизации ГВО на период 1991-2000 гг. («Программа 1991») и по Программе модернизации ГВО на период 2001-2010 гг. («Программа 2010»). Из запланированных «Программой 1991» объемов нивелирования было выполнено 45% объемов работ по нивелированию I класса и 22% по нивелированию II класса. Из запланированных «Программой 2010» объемов нивелирования I и II классов выполнено всего 17.3% нивелирования I класса и 4.8% нивелирования II класса. В последнее время работы по модернизации и развитию ГВО осуществляются в рамках двух мероприятий Росреестра - «Оптимизация Главной высотной основы (ГВО) в пограничных областях России с целью формирования полигонов I класса» и «Модернизация Главной высотной основы (ГВО) России с целью обновления высот по линиям нивелирования ГВО, измеренных в 60-х и 70-х годах прошлого столетия». Одновременно с этим выполняются работы по подготовке исходных данных для нового уравнивания ГВО и установления новой государственной системы нормальных высот [1, 90].

Геометрическое нивелирование является наиболее трудоёмким и дорогостоящим методом в системе геодезического обеспечения. Развитие спутниковых технологий создаёт возможность эффективного использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в системе высотного обеспечения. Строгое в рамках теории Молоденского соотношение (46) $H^y = H - \zeta$, устанавливающее связь гравиметрической высоты квазигеоида ζ , геодезической H и нормальной высот H^y , можно по-прежнему использовать для косвенной интерполяции. Подобно тому, как при астрономо-гравиметрическом нивелировании такая косвенная интерполяция высоты квазигеоида помогала передавать геодезические высоты над референц-эллипсоидом от исходного пункта во все пункты ГГС, спутниковое нивелирование помогает переносить нормальную высоту на определяемые пункты с исходных на большие расстояния [27].

Таким образом, применение спутниковых технологий в системе высотного обеспечения требует построения точного квазигеоида по гравиметрическим данным. В свою очередь при выполнении гравиметрических измерений необходимо знание нормальной высоты в гравиметрических пунктах. Эти требования и обуславливают тесную взаимосвязь в развитии систем координатного, высотного и гравиметрического обеспечения на новом, более высоком уровне точности [27,84].

Важным аспектом применения гравиметрических данных и спутниковых данных в системе высотного обеспечения является развитие метода спутникового нивелирования, как возможной альтернативы наиболее трудоёмким и дорогостоящим методам традиционного геометрического нивелирования.

В данном случае использование современных спутниковых технологий в системе высотного обеспечения не следует рассматривать в качестве альтернативы высокоточного геометрического нивелирования I, II классов. На данном этапе развития системы геодезического обеспечения методы спутникового нивелирования реально применять при определении нормальных высот с точностью государственного нивелирования III, IV классов.

Данные высокоточных ГНСС измерений в системе высотного обеспечения следует использовать в целях контроля главной высотной основы и достоверности современных вертикальных движений земной коры, а так же повышения точности передачи значений нормальных высот от исходного пункта (Кронштадтский футшток) на территорию Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Если по исследованиям ЦНИИГАиК, выполненным ранее для Европейской части России, совместный анализ нивелирных и спутниковых данных с использованием равенства (1) и данных высот квазигеоида подтверждает оценку точности ГВО, то для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока различие спутниковых и нивелирных данных втрое превосходит их априорную оценку точности.

В этих условиях, принятая концепция связи пунктов ФАГС с реперами нивелирования I класса и пунктов ВГС с реперами нивелирования I или II класса обеспечит решение задачи контроля и повышения достоверности данных о точности ГВО. Непрерывность измерений на постоянно действующих пунктах ФАГС и повторные измерения на пунктах ВГС (через 5-10 лет) позволят судить о достоверности и однозначности нивелирных данных о вертикальных движениях земной поверхности.

Таким образом, в направлении развития системы высотного обеспечения в современных условиях наряду развитием повторного геометрического нивелирования (в первую очередь нивелирования I класса) и внедрением современных цифровых нивелиров необходимо использование данных постоянно действующих пунктов ФАГС и повторных измерений на пунктах ВГС в целях контроля и повышения точности ГВО.

Другим важным направлением развития современной системы высотного обеспечения в настоящее время является разработка новых принципов отсчёта нормальных высот.

При существующих принципах установления системы отсчета высот относительно среднего многолетнего уровня моря в одном исходном пункте создаётся ряд противоречий, которые не могут быть разрешены традиционными методами геодезических измерений. Однако эти противоречия не могут быть игнорированы при существующей точности современных спутниковых методов и при решении фундаментальных задач современной геодезии. Эти противоречия связаны с тем, что различия средних многолетних уровней моря на разных уровнемерных постах могут достигать метра и более (рис. 37).

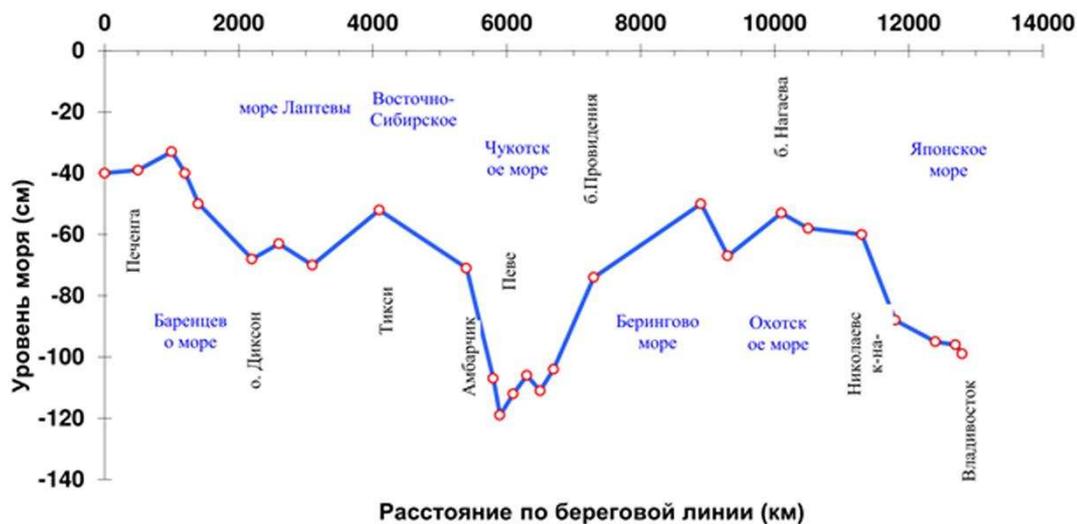


Рис. 37. Средние уровни морей Северного Ледовитого и Тихого океанов в Балтийской системе высот [27, 84]

Для решения большинства задач традиционной геодезии эта неопределенность не вызывала особых проблем, поскольку точность системы высот порядка одного метра удовлетворяла требованиям к точности редукции базисных измерений на поверхность эллипсоида. Но и к тому же, что самое главное, не существовало других методов для установления системы отсчета высот.

В настоящее время высокоточные средства спутниковых измерений геодезической высоты результатам их совместной обработки с гравиметрическими и нивелирными данными обеспечивают возможность создания новых принципов отсчёта нормальных высот.

Высоты квазигеоида, определяемые по гравиметрическим данным, теоретически строго определяются относительно общего земного эллипсоида, центр которого совмещен с центром масс Земли. Размер большой полуоси общего земного эллипсоида в этом случае определяется условием равенства нулю интеграла по всей поверхности Земли σ от гравиметрических высот квазигеоида ζ , вычисленных по гравиметрическим данным:

$$\int_{\sigma} \zeta d\sigma = 0. \quad (47)$$

Именно это свойство гравиметрических высот квазигеоида обеспечивает их эффективное использование при решении проблемы установления единой общемировой системы нормальных высот, и как следствие возможность контроля геоцентричности систем координат.

Основная идея новых принципов установления единой общемировой системы нормальных высот состоит в том, что единую систему отсчета высот определяет поверхность общего земного эллипсоида и, принимаемый за нормальный, потенциал U_0 на поверхности этого эллипсоида. Понятие геоида в этом случае формулируется как эквипотенциальная поверхность с потенциалом W_0 равным нормальному U_0 на поверхности общеземного эллипсоида. В этом случае не постулируется равенство нулю нормальной высоты на уровнемерных постах, принятых в качестве исходных. При этом подходе исходные нивелирные пункты вообще в принципе отсутствуют, как отсутствует исходный пункт в общеземной

геоцентрической системе координат. При этом систему координат определяет совокупность постоянно действующих геодезических пунктов, используемых для установления и периодического уточнения системы координат. На территории России такой совокупностью пунктов являются пункты ФАГС, а для распространения системы координат служат пункты ВГС, СГС-1, ГГС 1 – 4 классов, пункты дифференциальных станций [36, 83, 84].

Систему нормальных высот определяет совокупность геодезических пунктов, в каждом из которых с высокой точностью по спутниковым данным определена геодезическая (эллипсоидальная) высота H , нормальная высота H^N по нивелирным данным и высота квазигеоида ζ по гравиметрическим данным. На территории России такой совокупностью пунктов могут служить специально созданные исходные пункты Главной высотной основы в число которых могут быть включены пункты ФАГС конструкция центров которых позволяет их использование в качестве исходных пунктов ГВО. Для распространения системы нормальных высот должны служить пункты сети нивелирования I и II класса (ГВО) и пункты сети нивелирования III и IV класса, определяемые технологиями геометрического или спутникового нивелирования.

Применение спутниковых данных в системе высотного обеспечения во всех перечисленных выше направлениях требует в первую очередь построения детальных моделей гравиметрических высот квазигеоида по уровню точности, сопоставимой с нивелирными и спутниковыми данными.

К направлениям первоочередных работ по уточнению гравиметрических высот квазигеоида в соответствии с современными требованиями в первую очередь относятся:

- создание детальных цифровых гравиметрических карт аномалий Буге на территории России;
- построение высокоточной модели рельефа по современным топографическим картам и зарубежной информации на основе космических аппаратов в целях учёта редукции Буге при определении аномалий силы тяжести в редукции Фая (аномалия в свободном воздухе плюс топографическая поправка);
- разработка технологий построения планетарных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) высокого уровня детальности и точности.

Таким образом, проблема изучения гравитационного поля Земли (ГПЗ), являясь самостоятельным направлением научной и производственной деятельности, одновременно входит неотъемлемой составной частью в систему высотного и общего геодезического обеспечения.

В работе «Оценка изложения теории высот в отечественной литературе» [73, 108] предложено следующее взаимодействие геометрического и спутникового нивелирования.

Средний уровень моря и морская топографическая поверхность отклоняются от уровенной поверхности (геоида) в пределах двух метров по причине неоднородности морской воды (различные плотность, солёность, разность давления, температуры), течений, ветровых нагонов, поэтому при уравнивании обширных высотных сетей приходится использовать не все уровенные посты, а один исходный пункт на побережье. Но если в доспутниковую эпоху геометрическое

нивелирование было единственным способом связать уровни различных морей, то постепенно точность определения геодезических высот и гравиметрических аномалий высоты сравнялась, став меньше накопления систематических ошибок высокоточного геометрического нивелирования. В условиях, когда наземное геометрическое нивелирование не позволяет передать разность нормальных высот на большие расстояния (от 1 000 км) точнее спутникового нивелирования, высокоточное геометрическое нивелирование следует в перспективе применять лишь для распространения системы высот в главной высотной основе, считая исходными пунктами лишь те, которые полно обеспечены гравиметрической съемкой в очень большом радиусе (для интегрирования в ближней зоне при вычислении аномалии высоты).

На рис. 38 показаны наиболее выгодные места на территории России для организации исходных пунктов при установлении государственной системы высот, согласованной с мировой системой высот; указано, в окрестности каких населенных пунктов удобно выбрать фундаментальный или вековой репер, а также для наглядности приведены радиусы ближней зоны при вычислении аномалии высоты численным интегрированием [73, 108].

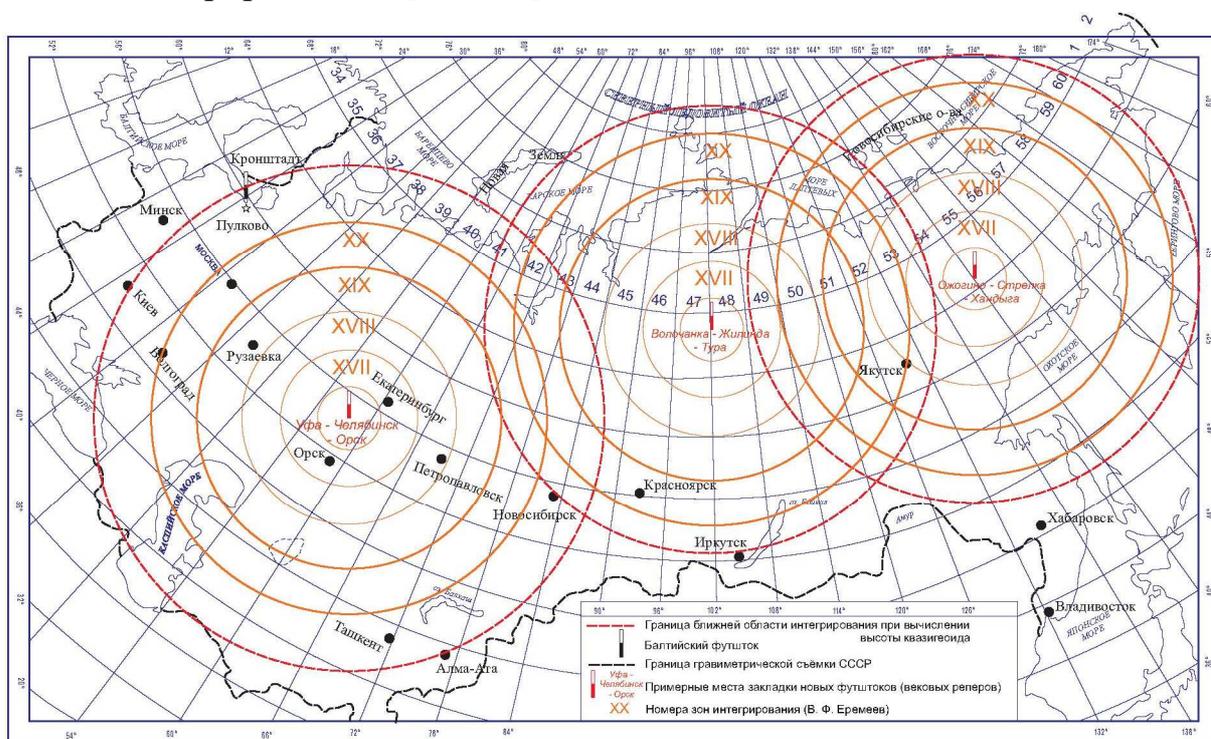


Рис. 38. Примерные места исходных пунктов на территории России [73, 108]

В настоящее время Главная высотная основа Российской Федерации включает в себя 188 нивелирных полигонов I класса. Периметры полигонов колеблются в пределах от 0,2 до 4,7 тыс. км. Замыкание измерений в нивелирных полигонах I класса определяется периодом от 20 до 40 лет. Анализ полигонов I класса ГВО показал, что 28 из них имеют недопустимые невязки.

Из анализа разностей $\Delta = H - H^y$ по всей стране получена величина систематической погрешности $\sigma = 0,07$ мм/км и она накапливается с одним знаком [108].

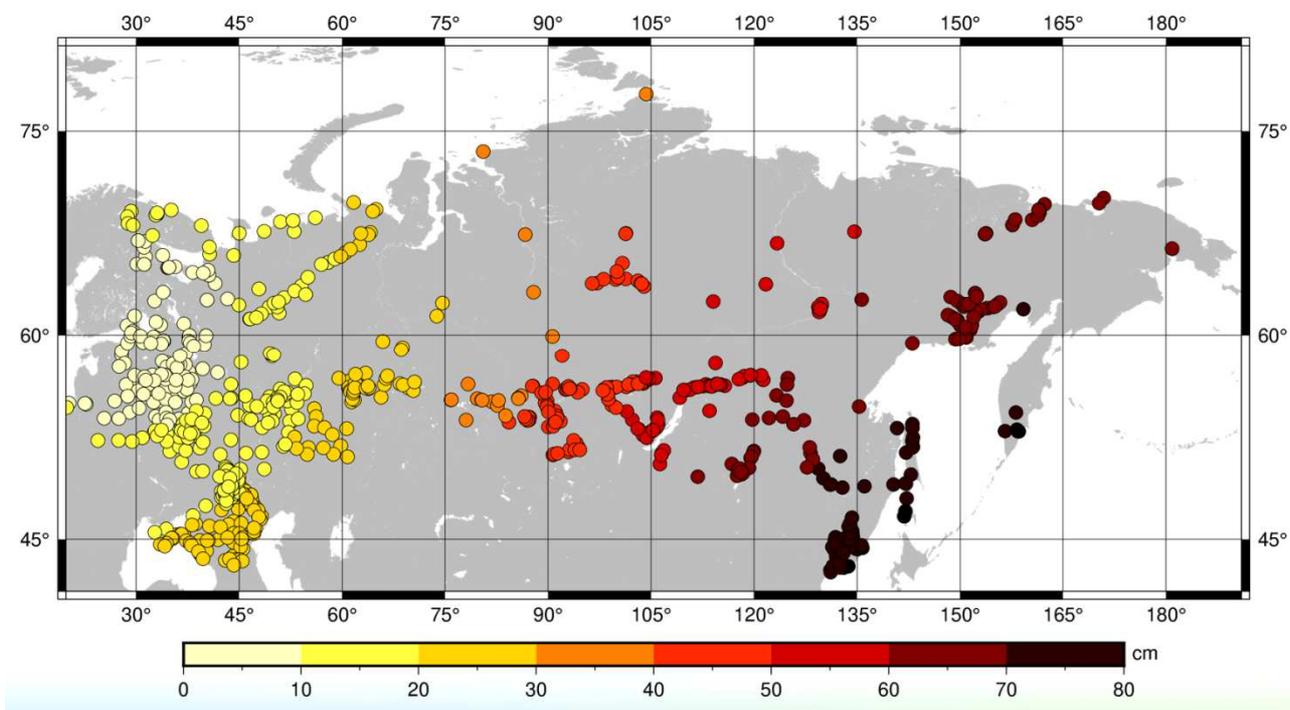


Рис. 39. Средние квадратические погрешности передачи высоты [108]

В таблице 18 приведены накопленные погрешности для некоторых городов.

Таблица 18

Расстояние от футштока, км	Город	Накопленные погрешности, см
700	Москва	- 5
2 500	Екатеринбург	- 18
5 900	Иркутск	- 41
9 800	Владивосток	- 67

Вопросы установления европейской и единой общеземной систем высот

Глобализация современной геодезии обуславливает необходимость международной интеграции в решении фундаментальных проблем. Именно широкая международная интеграция обеспечила создание достаточно равномерно распределенной по всей территории земного шара опорной геодезической сети и построение общеземной высокоточной геоцентрической системы координат.

Решение проблемы установления европейской и единой общеземной системы высот на современном уровне точности возможно также только при условии широкой международной кооперации.

Первоочередными и необходимыми элементами такой кооперации являются:

- нивелирная связь государственных (национальных) нивелирных сетей стран Европы;
- создание единого массива данных средних аномалий по трапециям 5'x5' для Северного полушария;
- построение точного квазигеоида Евразийского континента;
- построение точных планетарных моделей гравитационного поля Земли с использованием современных космических комплексов GRACE, CHAMP и GOCE.

Итогом результатов на основе такой кооперации будет построение единой общеевропейской, а затем общеземной систем нормальных высот.

Традиционно за уровенную поверхность, относительно которой определялись высоты точек земной поверхности, принималась осреднённая невозмущенная поверхность мирового океана. А в качестве начала счёта высот принимался средний уровень моря в одном исходном пункте. Поскольку в действительности в различных морях средний уровень может значительно (в пределах нескольких дециметров) отличаться друг от друга, то и системы высот, распространяемые от среднего уровня этих морей, будут отличаться друг от друга.

Только на территории Европы около 10 государственных нивелирных сетей, для каждой из них использовалась своя система высот, свой исходный пункт (уровнемерный пост), а следовательно, и «свой геоид». До развития спутниковых технологий не существовало других методов установления начала счёта нормальных высот, кроме футштока. В настоящее время создание глобальных навигационных систем создаёт условия для принципиально нового подхода к решению этой проблемы. На рис. 40 приведена схема расположения футштоков государственных нивелирных сетей государств Европы [27].

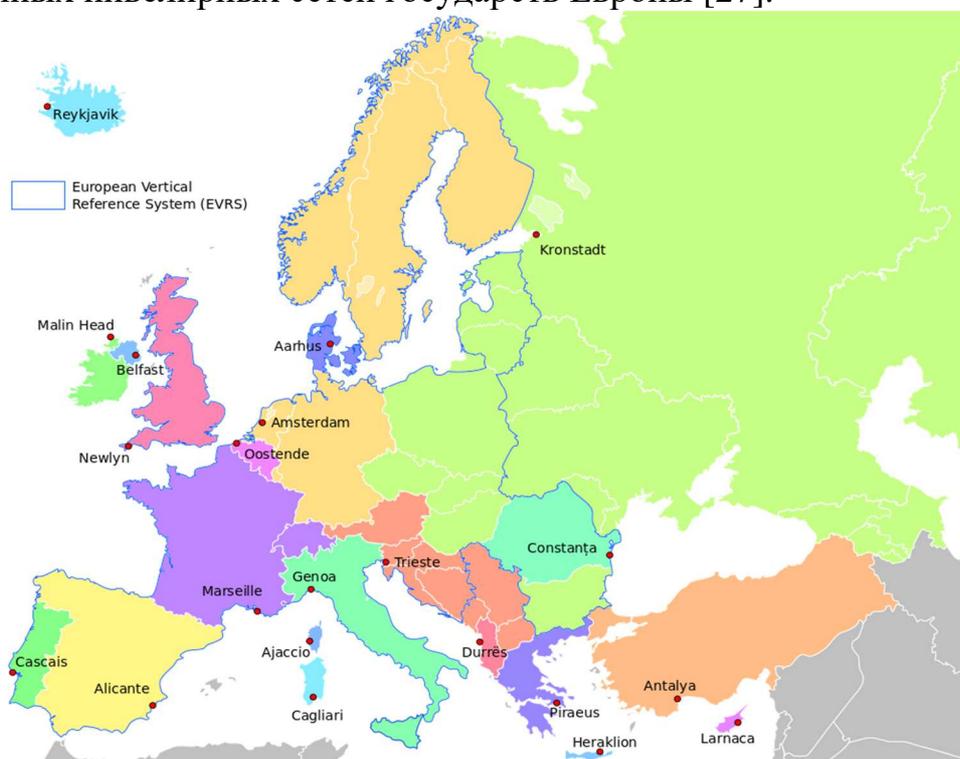


Рис. 40. Футштоки государственных нивелирных сетей Европы.

На рис. 41 приведены поправки в национальные системы высот за переход к одной из практических реализаций этой системы EVRF2007.

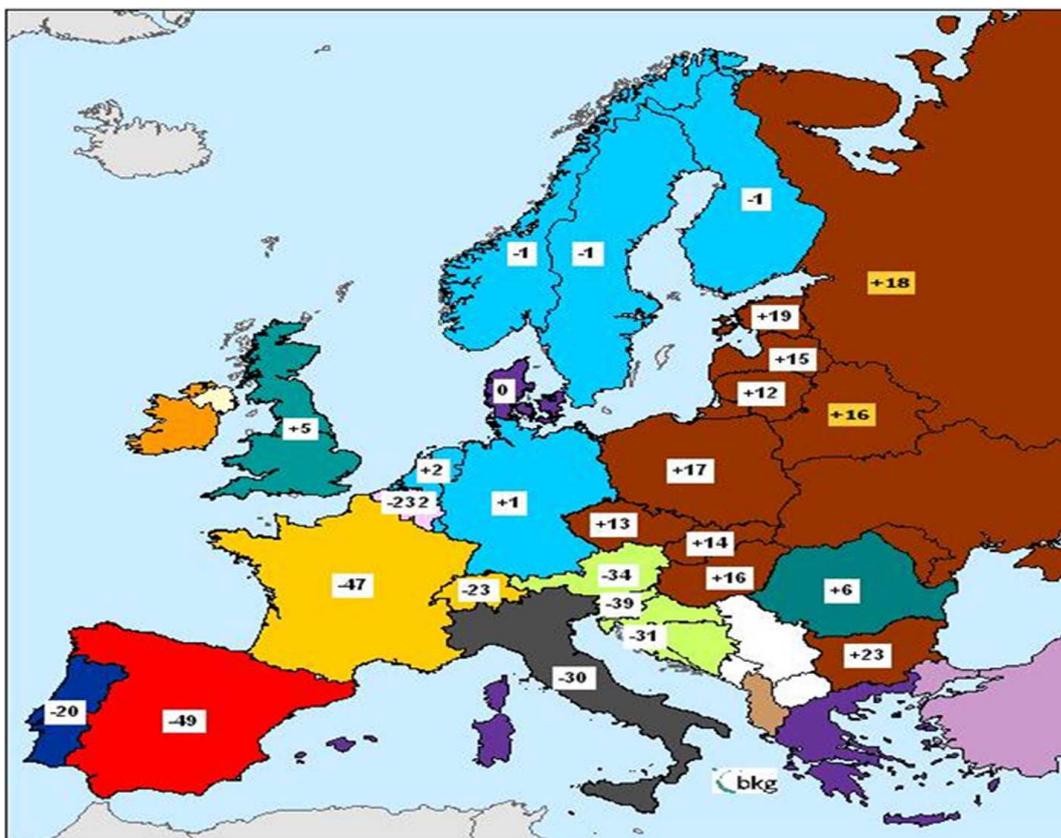
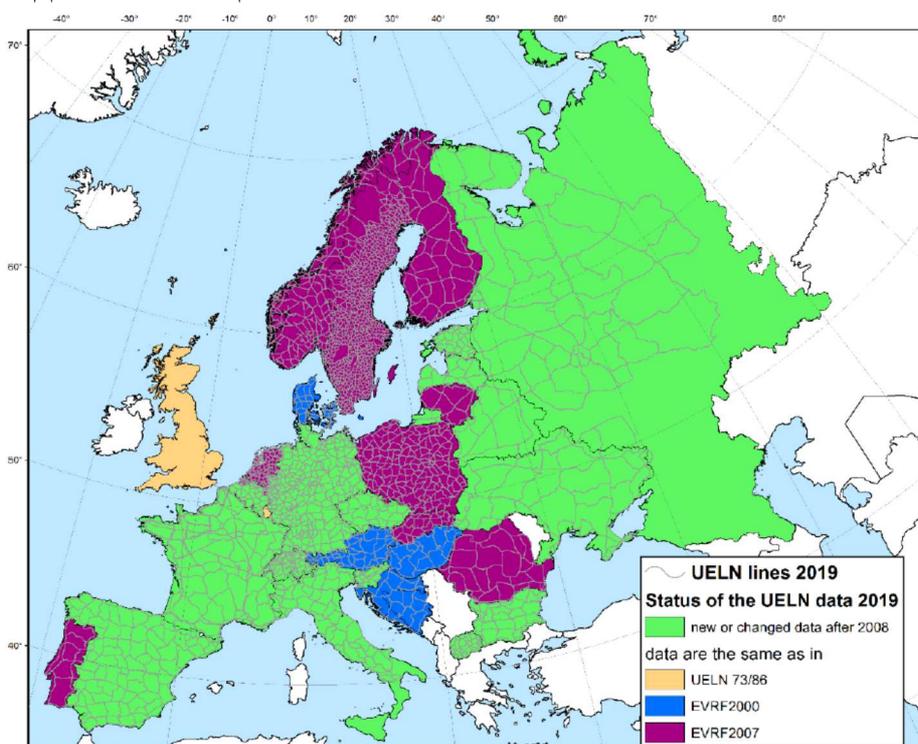


Рис. 41. Поправки в национальные системы высот при переходе к EVRF2007

Созданием общеевропейской нивелирной сети UELN (United European Leveling Network, UELN) с 80-х годов прошлого века занимается Федеральное агентство картографии и геодезии Германии ВКГ (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, ВКГ) в рамках реализации решений Европейской подкомиссии Международной ассоциации геодезии. Вначале в проекте участвовало 20 стран, позднее присоединились еще пять.



Российская Федерация участвовала в данных работах в рамках соглашений о научном сотрудничестве, заключенных Роскартографией с ВКГ и Финским геодезическим институтом (FGI).

В настоящее время Европейская система высот EVRS в реализации EVRF2019 действует только на территории UELN, которая более или менее ограничена материковой Европой. Для определения высот в системе EVRS на островах подходящим методом оказалось использование ГНСС и европейского квазигеоида. Следует заметить, что уравнивание UELN выполнено в геопотенциальных числах, а окончательный каталог высот представлен в геопотенциальных числах и в нормальных высотах.

Следуя тенденции глобализации и упрощая практическое применение теории Молоденского, нужно принять общее начало счета высот и установить равенство $U_0 = W_0$, выделив еще один геоид – земную уровенную поверхность, потенциал W_0 которой равен потенциалу U_0 силы тяжести на отсчетном эллипсоиде [27].

Общий земной эллипсоид представляет Землю в среднем, по большей части на океанах (в связи с этим проф. Л. В. Огородова даже использовала термин «океаноид»). Общий земной эллипсоид, принимаемый в качестве нормального, должен удовлетворять условию (47):

$$\int_{\sigma} \zeta d\sigma = 0.$$

для всей поверхности Земли σ . Следовательно, величина $U_0 = W_0$ представляет потенциал близко к среднему его значению W_0 и на океанах. Таким образом, решение $U_0 = W_0$ будет также оптимальным приближением к геоиду в смысле Брунса и Гаусса-Листинга в среднем для всей Земли.

Поверхность общего земного эллипсоида является отсчетной при определении эллипсоидальных (геодезических) высот. Именно применение нормальных высот H^y и высот квазигеоида ζ позволяет строго и однозначно согласовать нивелирные данные с результатами определения эллипсоидальных (геодезических) высот H по спутниковым данным. Это утверждение ни в коей мере не исключает возможность использования геопотенциальных чисел, поскольку между величинами нормальной высоты и геопотенциала существует строгое соответствие:

$$W_i = \gamma_m H_i^y. \quad (48)$$

В соответствии с теорией М. С. Молоденского сумма нормальной высоты и высоты квазигеоида теоретически равна геодезической высоте точки физической поверхности Земли над общим земным эллипсоидом, принятым за нормальный:

$$H = H^y + \zeta, \quad (49)$$

где H – геодезическая высота; H^y – нормальная высота; ζ – высота квазигеоида.

Несоблюдение этого условия обуславливается ошибками измерений и различиями региональных систем отсчета нормальных высот.

Значение поправки к данной –ой региональной системе высот за переход к общеземной будет определяться по всей совокупности N геодезических пунктов, для которых известны эти величины:

$$\Delta H_i^Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - (H_i^Y + \zeta_i)). \quad (50)$$

Таким образом, фиксированный закрепленный на местности исходный пункт, в котором нормальная высота равна нулю, отсутствует, но это не является практической трудностью. Нормальная высота равна нулю в той точке земной поверхности, в которой реальный потенциал W_i равен нормальному U_0 на поверхности общего Земного эллипсоида. В этой же точке совпадают поверхности геоида и квазигеоида $W_i = W_0 = U_0$. В принципе положение этой точки может быть и не известно.

В этих условиях особое значение приобретает проблема построения новых современных планетарных гравитационных моделей. В 2012 году было выполнено построение новой глобальной гравитационной модели ГАО-2012 с использованием данных проектов для решения проблемы построения гравиметрического геоида.

С использованием моделей ГАО-2012, EIGEN-5C и EGM2008 была выполнена оценка возможности определения поправок к региональным системам нормальных высот в соответствии с предлагаемой технологией. Результаты такой оценки приведены в табл. 19.

Таблица 19

Регион	Средние разности ΔH_{cp} , м		
	ГАО-2012	EIGEN-5C	EGM2008
США (6 169 пунктов)	1,0421	1,0367	1,0277
Германия (87 пунктов)	0,6004	0,5962	0,5901
Россия (526 пунктов)	0,2376	0,2040	0,2016
Западная часть России	0,4051	0,3564	0,3593
Восточная часть России	-0,0226	-0,0327	-0,0434

Таким образом, величины ΔH_{cp} для разных групп характеризуют отличие систем высот для территорий США, Европы и России от общеземной, устанавливаемой в соответствии с изложенными принципами. Подтверждением достоверности полученных результатов являются данные об отличии Амстердамской системы высот и Кронштадтской по нивелирным данным. По нивелирным данным и по данным модели ГАО-2012 эта разность равна 16 см.

Международная система отчета высот - International Height Reference Frame (IHRF), принятая Международной ассоциацией геодезии (IAG) в своей Резолюции № 1 на XXVI Генеральной Ассамблее Международного геодезического и геофизического союза - МГГС (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG) в Праге в 2015 году, содержит два нововведения:

- официально принята концепция среднего прилива / поверхности (mean tide / mean crust);

- в качестве отчетной поверхности принята поверхность геоида.

Потенциал на поверхности геоида - гравитационная постоянная:

$$W_0 = W_0^{IHRF} = 6,26368534 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2.$$

Измеряемая физическая величина - геопотенциальное число:

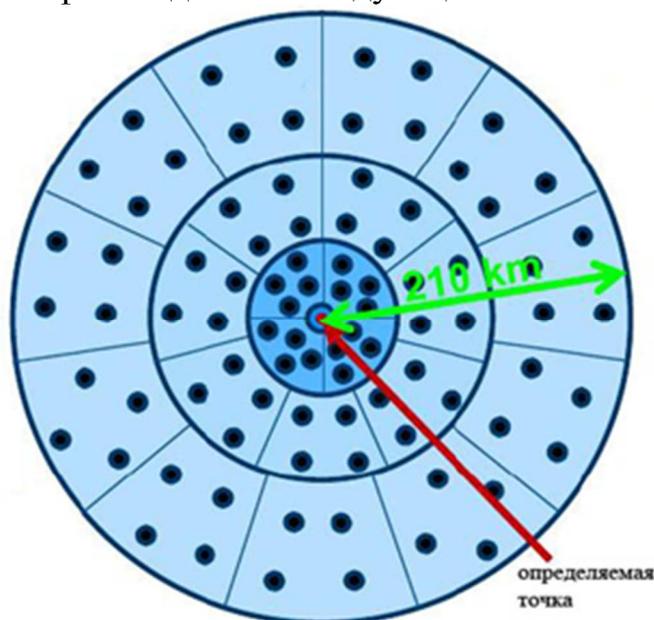
$$\Delta C_p = W_0 - W_p ,$$

где W_p - гравитационный потенциал в исследуемой точке.

Требования к точности измерений:

$$\delta C_p = 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^2 \ (\delta H \approx 1\text{мм}).$$

С использованием таких нововведений должны создаваться не привязанные к уровням морей и береговым линиям футштоки Международной системы отсчета высот (IHRС). Определение гравитационного потенциала в местах расположения футштоков необходимо производить по следующей схеме.



Расстояние от определяемой точки (радиус окружности)	Количество секторов	Общее количество гравиметрических измерений
10 км	1	4
50 км	4	16
110 км	7	28
210 км	11	44

Рис. 43. Схема определения гравитационного потенциала в местах расположения футштоков

Другим вариантом является предполагаемая реализация международной сети квантовых футштоков, основанных на эффекте Саньяка. Общая схема расположения квантовых футштоков Международной системы отсчета высот (IHRС) приведена на рисунке.



Рис. 44. Предполагаемая реализация международной сети квантовых футштоков

Развитие новых технологий и средств геодезических измерений привело к необходимости изменений в принципах построения всей системы геодезического обеспечения. Эти принципиальные изменения происходят не только в структуре построения геодезических сетей (спутниковых, нивелирных и гравиметрических), но в характере взаимосвязей составляющих системы геодезического обеспечения: координатной, высотной и гравиметрической. Это связано в первую очередь с повышением точности системы координат ГСК-2011 практически на порядок по сравнению с СК-95 (на два порядка по сравнению с СК-42) и изменением принципов ориентации осей координат в теле Земли относительно центра масс и оси вращения.

Внедрение в практику научной и хозяйственной деятельности современной системы геодезического обеспечения и её дальнейшее развитие обуславливают необходимость решения целого комплекса научно-технических задач, включая совершенствование вопросов законодательного и правового характера.

Решение вопросов дальнейшего развития системы высотного и гравиметрического обеспечения в первую очередь связано с совершенствованием сети ГВО, как основы государственной системы нормальных высот. Это совершенствование, по нашему мнению, должно идти в двух направлениях - создание 3-4 исходных пунктов ГВО, с выполнением на них комплекса работ от закладки группы центров (исходных, рабочих, контрольных) до выполнения спутниковых, нивелирных и гравиметрических работ по их связи с существующими сетями пунктов ГВО, ФАГС, ВГС и пунктами фундаментальной гравиметрической сети.

Проектирование новых исходных пунктов ГВО должно вестись с учётом геотектонической структуры территории России. Эти требования к размещению новых исходных пунктов ГВО, во-первых, обеспечат дифференцированный подход к определению скоростей изменений высот во времени для разных геотектонических структур, а во-вторых, создадут более благоприятные условия для

нового цикла уравнивания государственной нивелирной сети и уточнения каталогов высот.

Вопросы сохранности геодезических центров связаны с причинами не только результатов хозяйственной деятельности, но и причинами природного характера - влияние изменений распространения вечной мерзлоты, процессов эрозии, которые в последние годы резко возросли, особенно в северных регионах, и других природных явлений.

Для уменьшения влияния причин природного характера, имея в виду в первую очередь сохранность реперов главной высотной основы, то, по нашему мнению, наиболее эффективно следует принимать меры в двух направлениях. Во-первых, следует совершенствовать конструкции нивелирных центров с использованием, где это возможно, буровых технологий и значительно увеличить в процентном отношении число фундаментальных и вековых реперов (последние в обязательном порядке для исходных и узловых пунктов ГВО). Второй путь связан с комплексированием исходных и узловых пунктов ГВО с пунктами ФАГС и ВГС.

Повышение требований к точности определения высот квазигеоида обуславливает необходимость не только повышения детальности и точности гравиметрических данных и данных о рельефе, но, а также дальнейшее развитие теории определения геопотенциала и её практическая реализация в современной системе геодезического обеспечения.

8 Определение параметров преобразования координатных систем и некоторые вопросы государственной тайны в сфере геодезии, картографии, ДЗЗ

Определение параметров преобразования координатных систем

Определение параметров преобразования координатных систем рассмотрим на примере плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса-Крюгера. Такая процедура требует знания координат нескольких пунктов P_i в двух системах координат X, Y и x, y .

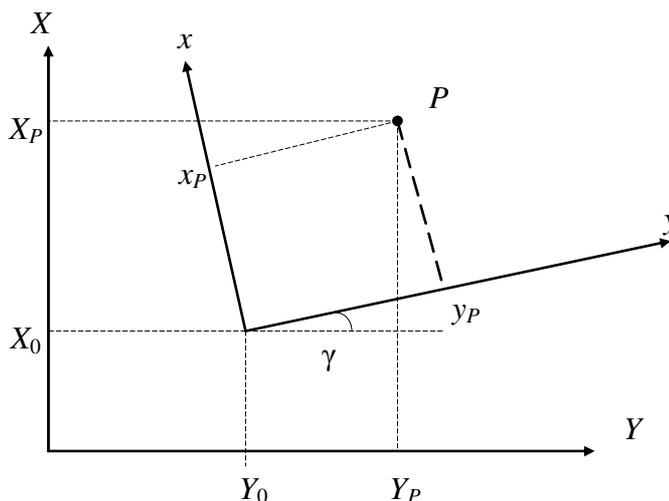


Рис. 44. Определение параметров преобразования плоских прямоугольных координат

Процесс определения приближенных параметров преобразования - смещение начала систем координат $(X_0 - x_0, Y_0 - y_0)$, угол разворота (γ) и изменение масштаба (χ) был регламентирован еще в 80-х годах, и достаточно подробно рассмотрен в Руководстве по математической обработке геодезических сетей и составлению каталогов координат и высот пунктов в городах и поселках городского типа [80].

Преобразование одной системы (СК1) плоских декартовых прямоугольных координат x, y в другую (СК2) X, Y выполняют по известной формуле:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{СК2}} = \chi \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \end{bmatrix}. \quad (51)$$

Решая систему уравнений для четырех пунктов можно получить значения приближенных параметров преобразования.

В настоящее время разработано, предлагается к продаже, к свободному копированию и размещено в сети интернет большое количество программ преобразования координат, многие из которых реализуют функцию определения параметров преобразования координатных систем.

Помимо известной программы «Кредо Транскор», которая предлагается по цене свыше 50 тыс. руб., не менее известна программа «MapBasic. Пересчет координат МСК», содержащая параметры преобразования практически всех известных систем координат. Разработчиками «MapBasic. Пересчет координат МСК» сделана специальная оговорка «Калькулятор создан для определения приблизительного местоположения точек в различных системах координат. Результаты пересчета нельзя использовать в кадастровых и геодезических работах любого вида».

Бесплатная программа «PHOTOMOD GeoCalculator» предназначена для пересчета координат точек из одной системы координат в другую. «PHOTOMOD GeoCalculator» включен в ЦФС PHOTOMOD, доступен как отдельная программа или мобильное приложение.

Представляют интерес программы на сайтах «LatLong», «Программный центр Полигон», «Geoproj», «GEOBRIDGE» и ряд других.

В работе «Сравнительный анализ точности преобразований координат при использовании различных онлайн-конверторов» [65] и на сайте «Лига геодезистов» выполнен обзор и анализ некоторых известных программ преобразования координат.

Вопросы государственной тайны в сфере геодезии, картографии, ДЗЗ

Часть информации о координатах и высотах геодезических пунктов, системах координат и параметрах преобразования отнесена к сведениям, составляющим государственную тайну. Для сознательного использования функции определения параметров преобразования координатных систем, целесообразно ознакомиться с системой регулирования вопросов государственной тайны в сфере геодезии, картографии, ДЗЗ.

Нормативное регулирование вопросов государственной тайны в сфере геодезии, картографии, ДЗЗ осуществляется на основе Конституции Российской Федерации [16], Федерального закона «О безопасности» [89], Закона Российской

Федерации «О государственной тайне» [14], Указа Президента Российской Федерации «Об утверждении Перечня сведений, отнесенных к государственной тайне» [31], Постановления Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил отнесения сведений, составляющих государственную тайну, к различным степеням секретности» [76], Приказа Росреестра «Об установлении Порядка подготовки заключений о наличии в результатах геодезических и картографических работ сведений, составляющих государственную тайну» [78] и «Перечня сведений, подлежащих засекречиванию, действующий в федеральном органе исполнительной власти, осуществляющем функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере геодезии и картографии».

В статье 29 пункт 4 Конституции Российской Федерации [16] установлено «Каждый имеет право свободно искать, получать, передавать, производить и распространять информацию любым законным способом. Перечень сведений, составляющих государственную тайну, определяется федеральным законом».

Статья 8 «Полномочия Президента Российской Федерации в области обеспечения безопасности» пункт 7 а Федерального закона «О безопасности» [89] устанавливает, что Президент Российской Федерации решает в соответствии с законодательством Российской Федерации вопросы, связанные с обеспечением защиты информации и государственной тайны.

Закон Российской Федерации «О государственной тайне»

Закон Российской Федерации «О государственной тайне» [14] дает определение понятия «государственная тайна» - «государственная тайна - защищаемые государством сведения в области его военной, внешнеполитической, экономической, разведывательной, контрразведывательной и оперативно-розыскной деятельности, распространение которых может нанести ущерб безопасности Российской Федерации». Закон также определяет полномочия органов государственной власти и должностных лиц в области отнесения сведений к государственной тайне и их защиты, перечень сведений, составляющих государственную тайну, сведения, не подлежащие отнесению к государственной тайне и засекречиванию, порядок отнесения сведений к государственной тайне, порядок засекречивания сведений и их носителей, порядок рассекречивания сведений, ответственность за нарушение законодательства Российской Федерации о государственной тайне.

Полномочия органов государственной власти и должностных лиц в области отнесения сведений к государственной тайне и их защиты.

Президент Российской Федерации утверждает по представлению Правительства Российской Федерации Перечень должностных лиц органов государственной власти и организаций, наделяемых полномочиями по отнесению сведений к государственной тайне, а также Перечень сведений, отнесенных к государственной тайне.

Перечень сведений, составляющих государственную тайну

Государственную тайну составляют:

- 1) сведения в военной области;
- 2) сведения в области экономики, науки и техники;
- 3) сведения в области внешней политики и экономики.

К сфере геодезии, картографии, ДЗЗ относятся следующие сведения в области экономики, науки и техники:

- об использовании инфраструктуры Российской Федерации в целях обеспечения обороноспособности и безопасности государства;
- о достижениях науки и техники, о научно-исследовательских, об опытно-конструкторских, о проектных работах и технологиях, имеющих важное оборонное или экономическое значение, влияющих на безопасность государства.

Сведения, не подлежащие отнесению к государственной тайне и засекречиванию

- о чрезвычайных происшествиях и катастрофах, угрожающих безопасности и здоровью граждан, и их последствиях, а также о стихийных бедствиях, их официальных прогнозах и последствиях;
- о состоянии здравоохранения, санитарии, демографии, образования, культуры, сельского хозяйства, а также о состоянии преступности;
- о фактах нарушения прав и свобод человека и гражданина;
- о состоянии здоровья высших должностных лиц Российской Федерации;
- о фактах нарушения законности органами государственной власти и их должностными лицами;
- составляющие информацию о состоянии окружающей среды (экологическую информацию).

Порядок отнесения сведений к государственной тайне

Отнесение сведений к государственной тайне осуществляется в соответствии с Перечнем сведений, составляющих государственную тайну, определяемым настоящим Законом, руководителями органов государственной власти в соответствии с Перечнем должностных лиц, наделенных полномочиями по отнесению сведений к государственной тайне, утверждаемым Президентом Российской Федерации.

Органами государственной власти, руководители которых наделены полномочиями по отнесению сведений к государственной тайне, в соответствии с Перечнем сведений, отнесенных к государственной тайне, разрабатываются развернутые перечни сведений, подлежащих засекречиванию. В эти перечни включаются сведения, полномочиями по распоряжению которыми наделены указанные органы, и устанавливается степень их секретности.

Порядок засекречивания сведений и их носителей

Основанием для засекречивания сведений, полученных (разработанных) в результате управленческой, производственной, научной и иных видов деятельности органов государственной власти, предприятий, учреждений и организаций, является их соответствие действующим в данных органах, на данных предприятиях, в данных учреждениях и организациях перечням сведений, подлежащих засекречиванию.

При невозможности идентификации полученных (разработанных) сведений со сведениями, содержащимися в действующем перечне, должностные лица органов государственной власти, предприятий, учреждений и организаций обязаны обеспечить предварительное засекречивание полученных (разработанных) сведений в соответствии с предполагаемой степенью секретности и в месячный срок направить в адрес должностного лица, утвердившего указанный перечень, предложения по его дополнению (изменению).

Порядок рассекречивания сведений

Основаниями для рассекречивания сведений являются:

взятие на себя Российской Федерацией международных обязательств по открытому обмену сведениями, составляющими в Российской Федерации государственную тайну;

изменение объективных обстоятельств, вследствие которого дальнейшая защита сведений, составляющих государственную тайну, является нецелесообразной.

Органы государственной власти, руководители которых наделены полномочиями по отнесению сведений к государственной тайне, обязаны периодически, но не реже чем через каждые 5 лет, пересматривать содержание действующих в органах государственной власти, на предприятиях, в учреждениях и организациях перечней сведений, подлежащих засекречиванию, в части обоснованности засекречивания сведений и их соответствия установленной ранее степени секретности.

Ответственность за нарушение законодательства Российской Федерации о государственной тайне

Должностные лица и граждане, виновные в нарушении законодательства Российской Федерации о государственной тайне, несут уголовную, административную, гражданско-правовую или дисциплинарную ответственность в соответствии с действующим законодательством.

Соответствующие органы государственной власти и их должностные лица основываются на подготовленных в установленном порядке экспертных заключениях об отнесении незаконно распространенных сведений к сведениям, составляющим государственную тайну.

Указ Президента Российской Федерации «Об утверждении Перечня сведений, отнесенных к государственной тайне»

Указ Президента Российской Федерации в соответствии со статьей 4 Закона Российской Федерации «О государственной тайне» устанавливает Перечень сведений, отнесенных к государственной тайне и государственные органы и организации, наделенные полномочиями по распоряжению сведениями, отнесенными к государственной тайне [31].

К сфере геодезии, картографии, ДЗЗ относятся следующие пункты Перечня, относящиеся непосредственно к полномочиям Росреестра.

Пункт 51 «Сведения о подготовке и об использовании ресурсов единой сети связи Российской Федерации или ведомственных сетей связи в интересах обеспечения обороны, безопасности государства».

Пункт 60 «Геопространственные сведения по территории Российской Федерации и другим районам Земли, раскрывающие результаты топографической, геодезической, картографической деятельности, имеющие важное оборонное или экономическое значение».

Пункт 61 «Геопространственные сведения по территории Российской Федерации и другим районам Земли, раскрывающие результаты деятельности по дистанционному зондированию Земли (кроме данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с зарубежных космических аппаратов или российских космических аппаратов гражданского назначения), имеющие важное оборонное или экономическое значение».

Но кроме этих пунктов, в Перечне есть пункты, косвенно относящиеся к сфере геодезии, картографии, ДЗЗ.

Пункт 22 «Сведения об объектах инженерной инфраструктуры, о дислокации, назначении, степени готовности, защищенности, обеспечении безопасности или эксплуатации режимных объектов, не подпадающие под обязательства Российской Федерации по международным договорам, о выборе, предоставлении земельных участков, недр, акваторий или воздушного пространства для строительства или эксплуатации режимных объектов, о планируемых или проводимых изыскательских, проектных, строительномонтажных и иных работах по созданию режимных объектов».

Пункт 42 «Сведения о горных выработках, естественных полостях, метрополитенах или других сооружениях, которые могут быть использованы в интересах обороны страны».

Пункт 42.1 «Сведения, раскрывающие схемы водоснабжения городов с населением более 200 тыс. человек или железнодорожных узлов, расположение головных сооружений водопровода или водовода, их питающих».

Пункт 47 «Сведения, раскрывающие мероприятия по использованию объектов транспортной инфраструктуры и (или) транспортных средств в Российской Федерации в целях обеспечения безопасности государства, специальные меры по обеспечению безопасности перевозок или сохранности грузов, объемы воинских перевозок или маршруты транспортировки вооружения, военной техники».

Пункт 54 «Сведения о достижениях науки и техники, о технологиях, которые могут быть использованы в создании принципиально новых изделий, технологических процессов в различных отраслях экономики».

Пункт 64 «Сведения, раскрывающие прогнозные оценки научно-технического прогресса в Российской Федерации и его социально-экономические последствия по направлениям, определяющим обороноспособность, безопасность государства».

Пункт 68 «Сведения по вопросам внешней политики, внешней торговли, научно-технических связей, раскрывающие стратегию, тактику внешней политики Российской Федерации, преждевременное распространение которых может нанести ущерб безопасности государства».

Правила отнесения сведений, составляющих государственную тайну, к различным степеням секретности

Утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации Правила [76] в зависимости от тяжести ущерба, который может быть нанесен безопасности Российской Федерации вследствие распространения, устанавливают следующие степени секретности сведений, составляющих государственную тайну:

- особой важности - сведения в области военной, внешнеполитической, экономической, научно-технической, разведывательной, контрразведывательной и оперативно-розыскной деятельности, распространение которых может нанести ущерб интересам Российской Федерации в одной или нескольких из указанных областей;

- совершенно секретные - сведения в области военной, внешнеполитической, экономической, научно-технической, разведывательной, контрразведывательной и оперативно-розыскной деятельности, распространение которых может нанести ущерб интересам государственного органа или отрасли экономики Российской Федерации в одной или нескольких из указанных областей;

- секретные - все иные сведения из числа сведений, составляющих государственную тайну. Ущербом безопасности Российской Федерации в этом случае считается ущерб, нанесенный интересам предприятия, учреждения или организации в военной, внешнеполитической, экономической, научно-технической, разведывательной, контрразведывательной или оперативно-розыскной области деятельности.

Порядок подготовки заключений о наличии в результатах геодезических и картографических работ сведений, составляющих государственную тайну

Установленный приказом Росреестра Порядок подготовки заключений [78] определяет, что экспертиза результатов геодезических и картографических работ на предмет наличия в них сведений, составляющих государственную тайну, проводится на основании заявления о проведении экспертизы в уполномоченный орган – Росреестр или его территориальные органы. Экспертиза возлагается на экспертные комиссии, создаваемые уполномоченными органами.

Экспертная комиссия:

- запрашивает в федеральных органах исполнительной власти и организациях, указанных в пунктах 22 - 24 Перечня сведений, отнесенных к государственной тайне, утвержденного Указом Президента Российской Федерации [31], сведения, необходимые для проведения экспертизы результатов геодезических и картографических работ;

- анализирует представленные на экспертизу результаты геодезических и картографических работ на предмет наличия в них сведений, подпадающих под действие перечня сведений, подлежащих засекречиванию, действующего в федеральном органе исполнительной власти, осуществляющем функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере геодезии и картографии;

- на основании ответов, полученных от заинтересованных федеральных органов исполнительной власти и организаций, и проведенного анализа

представленных на экспертизу результатов геодезических и картографических работ на предмет наличия в них сведений, подпадающих под действие Перечня сведений, подлежащих засекречиванию, подготавливает заключение о степени секретности сведений, содержащихся в результатах геодезических и картографических работ.

В случае наличия в результатах геодезических и картографических работ сведений, составляющих государственную тайну, уполномоченный орган обязан принять меры по их засекречиванию, в том числе присвоению соответствующих грифов секретности их носителям.

Перечень сведений, подлежащих засекречиванию, действующий в федеральном органе исполнительной власти, осуществляющем функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере геодезии и картографии

Перечень сведений, подлежащих засекречиванию, действующий в Росреестре является закрытым документом и доступен не всем субъектами геодезической и картографической деятельности, перечисленными в части 1 статьи 4 Федерального закона «О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

В соответствии с Законом Российской Федерации «О государственной тайне» [14] Перечень сведений, подлежащих засекречиванию, пересматривается через каждые 5 лет.

ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ

Основные

1. Басманов А. В. История создания и развития нивелирной сети России / Физическая геодезия. Научно-технический сборник ЦНИИГАиК. - Москва. - Научный мир. - 2013. - с.151-163. - EDN: [QKEJCSX](#)
2. 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. ISBN: 5-86066-063-4. <https://search.rsl.ru/ru/search#yf=1999&q=5860660634>.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=19479221>
3. 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. - ISBN 978-5-98597-312-9. - EDN: [XWHNMH](#). <https://search.rsl.ru/ru/search#q=9785985973129>.
4. Герасимов А. П., Назаров В. Г. Местные системы координат. М.: ООО «Издательство «Проспект». - 2010. - 64 с. ISBN 978-5-98597-168-2. EDN: [QKJADV](#). <https://search.rsl.ru/ru/search#q=004731444/>
5. ГЛОНАСС и геодезия / А. Е. Алтынов, А. А. Басманов, Н. А. Бовшин и др. Под общей редакцией Г. В. Демьянова, Н. Г. Назаровой, В. Б. Непоклонова, Г. Г. Побединского, Л. И. Яблонского. – Москва. - Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных. - 2016. – 272 с. – ISBN 978-5-903547-19-7. – EDN [WVTRVT](#). <https://search.rsl.ru/ru/search#q=008654596>.
6. ГОСТ 22268-76 Геодезия. Термины и определения. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 21 декабря 1976 г. № 2791.
7. ГОСТ 32453-2017 ГЛОНАСС. Методы преобразований координат определяемых точек. Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по результатам голосования (протокол от 30 августа 2017 г. № 102-П). Взамен ГОСТ 32453-2013. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 сентября 2017 г. № 1055-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 32453-2017 введен в действие в качестве национального стандарта с 1 июля 2018 г.
8. ГОСТ Р 52572-2006 Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2006 г. № 215-ст. Соответствует международному стандарту ИСО 19111:2003 «Географическая информация. Пространственное описание с использованием координат» (ISO 19111:2003 "Geographic information - Spatial referencing by coordinates", NEQ) в части требований к определению концептуальной схемы координатных систем отсчета и основных операций с координатами. Введен впервые.

9. ГОСТ Р 53374-2016 ГЛОНАСС. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС). Технические условия.
10. ГОСТ Р 8.699-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Величины, единицы, шкалы измерений, используемые в глобальной навигационной спутниковой системе.
11. Государственные геодезические сети новой структуры как основа высокоэффективной системы геодезического, картографического и навигационного обеспечения / Г. В. Демьянов, В. И. Зубинский, В. Б. Непоклонов, Г. Г. Побединский // В кн. ГЛОНАСС и геодезия. – М.: ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2016. – с. 29 – 38. – EDN [OTZUQF](#).
12. 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. - EDN: [UROENB](#).
http://www.geoprofi.ru/opinion/Article_4129_16.aspx.
<http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1065>
13. Дударев В. И. Классификация систем координат, применяемых в космической геодезии // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2010. - № 1, Том 1. – с. <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-sistem-koordinat-primenyaemyh-v-kosmicheskoy-geodezii>
14. Закон Российской Федерации от 21 июля 1993 г. № 5485-1 (ред. от 05.12.2022) «О государственной тайне»
15. Кашин Л. А. Построение классической астрономо-геодезической сети России и СССР. М., Картгеоцентр-Геодезиздат, 1999 г. 192 стр. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=003035089>
16. Конституция Российской Федерации. Принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 г. с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01 июля 2020 г.
17. Морозов В. П. Курс сфероидической геодезии. Учебник для вузов. – Москва. – Недра. - 1979. –260 с.
18. Нормы плотности размещения на территории Российской Федерации геодезических пунктов государственной геодезической сети, нивелирных пунктов государственной нивелирной сети и гравиметрических пунктов государственной гравиметрической сети. Утверждены распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 ноября 2016 г. № 2347-р. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_57539/
19. О нивелирной сети СССР (К 100-летию создания высокоточной нивелирной сети). ГУГК при СМ СССР. ВАГО. НТГО / Под общ. ред. Л. А. Кашина и Л. С. Хренова. - Москва. – Недра. - 1979. - 139 с. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=000992016>.
20. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Специализированный справочник. ВТУ ГШ ВС РФ. 2-е издание - Москва. – 2020. – 52 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://structure.mil.ru/files/pz-90.pdf>. (дата обращения 02.10.2020)
21. Побединский Г. Г., Кафтан В. И. Системы координат глобальные, континентальные, региональные, национальные: состояние, проблемы,

- перспективы. // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». – 2020. – № 3. – с. 4 - 59. ISSN: 2223-0831. - EDN [EDYLIZ](http://geosci.ru/www/wp-content/uploads/2023/03/GeoScience-2020-03.pdf). <http://geosci.ru/www/wp-content/uploads/2023/03/GeoScience-2020-03.pdf>
22. Побединский Г. Г., Кафтан В. И., Савиных В. П. Глобальная геодезическая система координат и предложения по участию РФ в ее создании (начало) // Геопрофи. - 2020. - № 3. - с. 42 - 51. - EDN: [UQQPGB](http://www.geoprofi.ru/opinion/global-naya-geodezicheskaya-sistema-koordinat-i-predlozheniya-po-uchastiyu-rf-v-ee-sozdani). <http://www.geoprofi.ru/opinion/global-naya-geodezicheskaya-sistema-koordinat-i-predlozheniya-po-uchastiyu-rf-v-ee-sozdani>
23. Побединский Г. Г., Кафтан В. И., Савиных В. П. Глобальная геодезическая система координат и предложения по участию РФ в ее создании (окончание) // Геопрофи. - 2020. - № 4. - с. 47 - 50. - EDN: [UZORZU](http://www.geoprofi.ru/opinion/global-naya-geodezicheskaya-sistema-koordinat-i-predlozheniya-po-uchastiyu-rf-v-ee-sozdanii-okonchanie). <http://www.geoprofi.ru/opinion/global-naya-geodezicheskaya-sistema-koordinat-i-predlozheniya-po-uchastiyu-rf-v-ee-sozdanii-okonchanie>
24. Попадьев В. В., Ефимов Г. Н., Зубинский В. И. Геодезическая система координат 2011 года // Астрономия, геодезия и геофизика: Научно-технический сборник. Посвящается памяти проф. Л. В. Огородовой. – Москва. - Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных, 2018. – С. 139-228. – EDN: [RLNFOX](http://www.geoprofi.ru/opinion/global-naya-geodezicheskaya-sistema-koordinat-i-predlozheniya-po-uchastiyu-rf-v-ee-sozdanii-okonchanie)
25. Порядок установления местных систем координат. Утвержден приказом Росреестра от 20 октября 2020 г. № П/0387.
26. 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/
27. Развитие системы высотного обеспечения / Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, И. А. Столяров, М. И. Юркина // В кн. ГЛОНАСС и геодезия. – М.: ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2016. –с. 124 – 133.
28. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН «Глобальная геодезическая система координат для целей устойчивого развития» (A/RES/69/266), принятая 26 февраля 2015 г. URL: http://ggim.un.org/documents/A_RES_69_266_R.pdf
29. Системы координат / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // В кн. ГЛОНАСС и геодезия. – М.: ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2016. –с. 16 – 28. – EDN [OTZUQF](http://www.geoprofi.ru/opinion/global-naya-geodezicheskaya-sistema-koordinat-i-predlozheniya-po-uchastiyu-rf-v-ee-sozdani).
30. Создание единой геодезической основы Европы: Обзорная информация. / Составитель Т. П. Агилера, перевод Л. И. Серебрякова. — М.: ЦНИИГАиК, 2003. — 104 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01002363411>
31. Указ Президента Российской Федерации от 30 ноября 1995 г. № 1203 (ред. от 25.03.2021) «Об утверждении Перечня сведений, отнесенных к государственной тайне» (п. 22, 42, 42.1, 48, 54, 60, 61)
32. Центр точных эфемерид. RGS Centre. Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rgs-centre.ru/>

Дополнительные

- 33.Авиационная радионавигация: Справочник. / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович, Э. А. Лутин, И. Б. Максимов. Под ред. А. А. Сосновского. — М.: Транспорт, 1990. — 264 с. ISBN 5-277-00741-5. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=001018138>
- 34.Бородко А. В., Еруков С. В., Побединский Г. Г. Комплексная топографо-геодезическая модель города // Великие реки – 2005: Тезисы докладов конгресса Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 17–20 мая 2005 г. - Том 1. - Нижний Новгород. – ННГАСУ. – 2005. - с. 326-328. - EDN: [URMZZA](#)
- 35.Бородко А. В., Ефимов Г. Н. О реконструкции геодезических сетей городов Московской области// Геодезия и картография. - 2002.- № 6.- с. 26-29.
- 36.Бровар Б. В., Горобец В. П., Попадьев В. В. О спутниковом нивелировании // Геодезия и картография. – 2015. – № 1. – С. 2-4. DOI: [10.22389/0016-7126-2015-895-1-2-4](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2015-895-1-2-4)
- 37.Гаврилов С. Г. Ефремова И. Б. Черников А. Я. Первая очередь Базовой региональной системы навигационно-геодезического обеспечения города Москвы. // Геопрофи. - 2011. - № 3. - с. 16 – 21. http://www.geoprofi.ru/technology/Article_5440_10.aspx
- 38.Геодезические сети специального назначения. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://cgkipd.ru/opendata/GSSN/>. (дата обращения 25.09.2020)
- 39.Геометрические и физические числовые геодезические параметры государственной геодезической системы координат 2011 года. Утверждены приказом Росреестра от 23 марта 2016 г. № П/0134. Отменен приказом Росреестра от 12 ноября 2021 г. № П/0516. [Электронный ресурс]. Доступ из справочной правовой системы КонсультантПлюс. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_198787/
- 40.Герасимов А. П. Местные системы координат. // Геопрофи. - 2009. - № 4. – с. 32 – 34. http://www.geoprofi.ru/opinion/Article_4328_16.aspx
- 41.Герасимов А. П. Уравнивание государственной геодезической сети. - Москва. – Картгеоцентр-Геоиздат. - 1996. - 216 с.
- 42.Герасимов А. П., Назаров В. Г. Местные системы координат. М.: ООО «Издательство «Проспект». - 2010. - 64 с. ISBN 978-5-98597-168-2. EDN: [QKJADV](#). <https://search.rsl.ru/ru/search#q=004731444/>
- 43.ГКИНП-05-029-84. Основные положения по содержанию топографических карт масштабов 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000. - Москва. - РИО ВТС. - 1984.
- 44.Горобец В. П., Побединский Г. Г., Столяров И. А. Основные направления формирования единой системы геодезического обеспечения Российской Федерации // Великие реки' 2017: Труды научного конгресса 19-го Международного научно-промышленного форума: в 3 томах. Том 1. Нижний Новгород, 16–19 мая 2017 г. – Нижний Новгород. – ННГАСУ. - 2017. – с. 338-357. – EDN: [ZREXVJ](#)
- 45.Государственная геоцентрическая система координат Российской Федерации / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, Г. Г. Побединский, Л. И. Яблонский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. - 2013. - № S2. - с. 76 - 94. - EDN: [QIPAYV](#).

46. Государственные системы координат: Анализ состояния и перспектив / В. И. Кафтан, Г. Г. Побединский, В. П. Савиных, И. А. Столяров // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». – 2022. - № 1. – с. 51 -61. - EDN: [ALCMQQ](https://alcmqq.giscenter.ru/content/uploads/GeoScience-12022-lite.pdf). <http://geo-science.ru/wp-content/uploads/GeoScience-12022-lite.pdf>
47. Гринберг Г. М. Математическая обработка городских геодезических сетей. – М.: Недра, 1992. - 191 с. ISBN 5-247-02356-0. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=001633045>
48. Демьянов Г. В. Геодезические системы координат, современное состояние и основные направления развития // Геодезия и картография. - 2008. - № 9. - С. 17-20.
49. Демьянов Г. В., Кафтан В. И., Побединский Г. Г. Научные и организационно-технические вопросы создания новой подкомиссии Международной Ассоциации Геодезии // Метрология времени и пространства. Материалы 6-го Международного симпозиума. Менделеево, 17-19 сентября 2012 г. - Менделеево. – ФГУП «ВНИИФТРИ». - 2012. - с. 185-186. - EDN: [SHEOWJ](https://sheowj.giscenter.ru/).
50. 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. - EDN: [XQIUQH](https://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1381). <http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1381>
51. Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России (продолжение) // Геопрофи. - 2011. - № 3. – с. 21 – 27. - EDN: [XQIVSH](https://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1405). <http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1405>
52. Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России (окончание) // Геопрофи. - 2011. - № 4. – с. 49 – 55. - EDN: [OTZAPB](https://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1421). <http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1421>
53. Ефимов Г. Н., Побединский Г. Г. О необходимости координации работ по созданию государственной и городских геодезических сетей // Геодезия и картография. - 1999.- № 3. - с. 24 - 30. - EDN: [UROAQA](https://geocartography.ru/archive/1999-march). <https://geocartography.ru/archive/1999-march>
54. Знатков С. А., Чечин А. В. Определение зон искажений площадей в проекциях местных систем координат. // 20-й Международный научно-промышленный форум «Великие реки'2018». Труды научного конгресса. В 3 т. Т. 1. - Нижний Новгород: ННГАСУ, 2018. - с. 315 - 318. - EDN: [VKHVYU](http://www.nngasu.ru/word/reki2018/velikie-reki-2018-1.pdf). <http://www.nngasu.ru/word/reki2018/velikie-reki-2018-1.pdf>
55. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000 и 1:500. ГКИНП-02-033-82. Утверждена ГУГК при СМ СССР 5 октября 1979 г. (с поправками, утвержденными ГУГК при СМ СССР 9 сентября 1982 г. - М., Недра, 1982, 160 с. <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=ESU&n=6638#06122896249444179>
56. Инструкция по топографо-геодезическим работам при инженерных изысканиях для промышленного, сельскохозяйственного, городского и поселкового

- строительства. СН 212-73. Утверждена Госстроем СССР 15 августа 1973 г. Москва. – Стройиздат. – 1974. – 149 с. Отменена СНиП 1.02.07-87. Инженерные изыскания для строительства.
57. Исследование движения геоцентра по данным измерений систем DORIS и GPS / С. П. Кузин, С. К. Татевян, С. Г. Валеев, В. А. Фасхутдинова // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2012. – № 23. – С. 265-271. – EDN: [QZXHLR](#)
58. Кафтан В. И. Системы координат и системы отсчета в геодезии, геоинформатике и навигации // Геопрофи. - 2008. - № 3. – с. 60 – 63. - EDN: [SGJXKN](#)
59. Кафтан В. И. Системы координат и системы отсчета в геодезии, геоинформатике и навигации (окончание) // Геопрофи. - 2008. - № 4. – с. 62 – 65. - EDN:
60. Кашин Л. А. Нивелирная сеть СССР / О нивелирной сети СССР (К 100-летию создания высокоточной нивелирной сети). ГУГК при СМ СССР. ВАГО. НТГО / Под общ. ред. Л. А. Кашина и Л. С. Хренова. - Москва. – Недра. - 1979. - с. 4-48. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=000992016>.
61. Косыков Б. И. Справочное пособие по съемке городов. 3-е издание, переработанное и дополненное. - М.: Недра, 1986. – 333 с. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=002137416>
62. Кузнецов Ю. Г. Государственная нивелирная сеть (главная высотная основа) // Гравиметрия и геодезия / Отв. ред. Б. В. Бровар. – Москва. - Научный мир. - 2010. – с. 287 – 299. – EDN: [QKJHQL](#)
63. Мещерский И. Н. Высокоточное нивелирование. // Геодезия и картография. - 1982. - № 2. - с. 57 - 59.
64. Научно-технические и организационные проблемы развития системы геодезического обеспечения Российской Федерации. / Г. Г. Побединский, В. И. Забнев, И. А. Столяров // Модернизация России: приоритеты, проблемы, решения. Ежегодник. Вып. 15: Материалы XIX Национальной научной конференции с международным участием «Модернизация России: приоритеты, проблемы, решения». Ч. 1 / РАН. ИНИОН. Отд. науч. сотрудничества; Отв. ред. В.И. Герасимов. – М., 2020. – с. 506 - 513. ISBN 978-5-248-00954-1. EDN [YHGDCR](#). <http://ukros.ru/archives/22646>. <http://innclub.info/archives/16770>. <https://www.academia.edu/42202130/>.
65. Непоклонов В. Б., Максимова М. В., Неподоба А. А. Сравнительный анализ точности преобразований координат при использовании различных онлайн-конверторов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». - 2022. - Т. 66. № 6. - С. 6–18. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-6-6-18
66. Нормы плотности размещения пунктов государственных нивелирных, геодезических и гравиметрических сетей на территории Российской Федерации. Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 16 августа 2002 г. № 608.
67. О геодезическом обеспечении территории России. К 80-летию Г. В. Демьянова. / А. В. Басманов, В. П. Горобец, В. И. Забнев, В. И. Кафтан, Г. Г. Побединский, И. А. Столяров, П. А. Ходаков // Геопрофи. - 2019. - № 6. – с. 10 – 15. - EDN: [OFQQCQ](#). <http://www.geoprofi.ru/issues/7035>. <http://www.geoprofi.ru/technology/o-geodezicheskom-obespechenii-territorii-rossii-k-80-letiyu-g-v-dem-yanova>

68. 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. - EDN: [VXKQZJ](#). <http://sgugit.ru/upload/interexpo-geo-siberia/collections/2016/Пленарное%20заседание.pdf>.
69. Организация Международной комиссии по региональной земной геодезической основе Северо-Восточной Евразии / В. П. Савиных, В. Г. Быков, А. П. Карпик, Б. Молдобеков, Г. Г. Побединский, Г. В. Демьянов, В. И. Кафтан, З. М. Малкин, Г. М. Стеблов, С. К. Татевян // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2013). Тезисы докладов пятой Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 15-19 апреля 2013 г. - Санкт-Петербург. - ИПА РАН. – 2013. - с.185-188.
70. План губернского города Нижнего Новгорода середины XIX в. на шести листах / М. А. Базина, Н. В. Егорова, С. В. Еруков [и др.]. Под общей редакцией Е. Г. Ивановой, Г. Г. Побединского. – Издание 2-е, переработанное и дополненное. – Нижний Новгород – АО «Верхневолжское аэрогеодезическое предприятие». - 2017. – 31 с. EDN: [ALQBAS](#)
71. Побединский Г. Г. Системы координат и нормативное регулирование создания и функционирования спутниковых сетей точного позиционирования // Геопрофи. - 2016. - № 6. - с. 4 - 12. - EDN [XQIYHR](#). <http://www.geoprofi.ru/technology/sistemyh-koordinat-i-normativnoe-regulirovanie-sozdaniya-i-funkcionirovaniya-sputnikovyykh-setej-tochnogo-pozicionirovaniya>.
72. Побединский, Г. Г. Программирование геодезических задач на языке БЕЙСИК. - М. – Недра. - 1991. – 86 с. ISBN: 5-247-02332-3. - EDN: [XZZQEP](#). <https://search.rsl.ru/ru/search#q=5247023323>. <https://lcn.loc.gov/90146546>
73. Попадьев В. В., Мосолкова И. Ю., Рахмонов С. С. Оценка изложения теории высот в отечественной литературе // Геодезия и картография. – 2021. – № 10. – С. 52–63. DOI:10.22389/0016-7126-2021-976-10-52-63
74. Порядок установления местных систем координат. Утвержден приказом Росреестра от 20 октября 2020 г. № П/0387.
75. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 июня 2002 г. № 608 «Об утверждении норм плотности размещения пунктов государственных нивелирных, геодезических и гравиметрических сетей и норм периодичности обновления государственных топографических карт и планов». Отменено постановлением Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2016 г. № 1174.
76. Постановление Правительства Российской Федерации от 4 сентября 1995 г. № 870 (ред. от 30.10.2021) «Об утверждении Правил отнесения сведений, составляющих государственную тайну, к различным степеням секретности»
77. Правила установления местных систем координат. Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2007 г. № 139. Отменены

- постановлением Правительства Российской Федерации от 4 октября 2017 г. № 1209.
78. Приказ Росреестра от 29 декабря 2020 г. № П/0496 «Об установлении Порядка подготовки заключений о наличии в результатах геодезических и картографических работ сведений, составляющих государственную тайну»
79. 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%20russian_web.pdf
80. Руководство по математической обработке геодезических сетей и составлению каталогов координат и высот пунктов в городах и поселках городского типа. ГКИНП-06-233-90. Утверждено Главным управлением геодезии и картографии при Совете Министров СССР 03 июля 1990 г. ГУГК при СМ СССР, М.: 1990. 376 с. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=001601453>
81. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. ГКИНП (ОНТА)-01-271-03 / В. А. Андриянов, А. В. Бородко, С. В. Еруков, Г. Н. Ефимов, В. С. Копачевский, Т. В. Лифарь, В. Я. Лобазов, Г. Г. Побединский, Е. В. Шабанов, Б. Н. Ямбаев. Утверждено приказом Федеральной службы геодезии и картографии России от 13.05.2003 № 84-пр. - Москва. - ЦНИИГАиК. - 2003. - 182 с. - EDN [XUUIKT](https://search.rsl.ru/ru/search#q=002363420). <https://search.rsl.ru/ru/search#q=002363420>. <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&ts=1953025852024874248630195606&cacheid=2E27C96BBF40F990757A38999C6E5371&mode=splus&base=EXP&n=385601&rnd=6D89D047EF7984C1D3AAD2C3C01EE1EA#9nhunfof708>
82. Серов А. Ю., Гаврилов С. Г. Создание современной геодезической основы Московского региона // Геопрофи. - 2014. - № 3. - с. 4 - 7. http://www.geoprofi.ru/technology/Article_6816_10.aspx
83. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат (начало) / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геопрофи. - 2013. - № 6. - с. 4-9. - EDN: [XQIWBN](http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1721). <http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1721>.
84. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Высотное и гравиметрическое обеспечение (окончание) / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геопрофи. - 2014. - № 1. - с. 5-11. - EDN: [XQIXBR](http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1739). <http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1739>.
85. Создание и реконструкция городских геодезических сетей по спутниковым технологиям / А. В. Бородко, С. В. Еруков, Г. Г. Побединский, Б. Н. Ямбаев // Геодезия и картография. - 2004. - № 2. - с. 15 - 25. - EDN: [XQIQCD](http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1739)
86. Сурнин Ю. В. О корректном применении международной терминологии «Reference System» и «Reference Frame» к понятиям «система координат» и «координатная основа» в геодезической практике России // Геодезия и картография. - 2015. - № 8. - С. 2-9. DOI: [10.22389/0016-7126-2015-902-8-2-9](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2015-902-8-2-9).
87. Сурнин Ю. В. О применении в геодезической практике России международной терминологии к понятиям «Система координат» и «Координатная основа» // Интерэкспо Гео-Сибирь. - 2013. - Т. 1, № 3. - С. 28-36. - EDN: [QITVCD](http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=1739) URL:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/o-primenenii-v-geodezicheskoy-praktike-rossii-mezhdunarodnoy-terminologii-k-ponyatiyam-sistema-koordinat-i-koordinatnaya-osnova> (дата обращения: 07.02.2023).
88. Тревого И. С., Шевчук П. М. Городская полигонометрия. – М.: Недра, 1986. – 199 с. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=002142049>
89. Федеральный закон от 28 декабря 2010 г. № 390-ФЗ (ред. от 28.04.2023) «О безопасности» (Ст. 8, п. 7 а)
90. Ходаков П. А., Басманов А. В. Состояние главной высотной основы Российской Федерации с учётом результатов выполненных объёмов геометрического нивелирования в 2012–2018 гг. // Геодезия и картография. - 2019.- № 5.- с. 12 - 22. DOI: [10.22389/0016-7126-2019-947-5-12-22](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2019-947-5-12-22)
91. Хренов Л. С. Первая инструкция по точному нивелированию в России и последующие нормативные документы по созданию нивелирной сети в стране / О нивелирной сети СССР (К 100-летию создания высокоточной нивелирной сети). ГУГК при СМ СССР. ВАГО. НТГО / Под общ. ред. Л. А. Кашина и Л. С. Хренова. - Москва. - Недра. - 1979. - с. 54-78. <https://search.rsl.ru/ru/search#q=000992016>.
92. Христов В. К. Координаты Гаусса-Крюгера на эллипсоиде вращения. – Москва. – Издательство геодезической литературы. - 1957. - 264 с.
93. EUREF Permanent GNSS Network. URL: <https://epncb.oma.be/>
94. EUROPEAN TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM 89 (ETRS89). [Electronic resource.] – URL: <http://etrs89.ensg.ign.fr/>.
95. GPS: The Global Positioning System. <https://www.gps.gov/>
96. IAU 2000 NFA GLOSSARY, latest revision: 25 July 2006. URL: http://syte.obspm.fr/iau/iauWGnfaTemp/IAU2000_NFA_Glossary.pdf
97. IAU 2006 NFA GLOSSARY, latest revision: 20 November 2007. URL: https://syte.obspm.fr/iauWGnfa/NFA_Glossary.pdf
98. IERS CONVENTIONS (2003) (IERS Technical Note No. 32) URL: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn32.html-1.htm?nn=94912>
99. IERS Conventions (2010) (IERS Technical Note No. 36). <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html-1.htm?nn=94912>
100. International Association of Geodesy – IAG. [Electronic resource.] – URL: <http://www.iag-aig.org/>
101. International Earth Rotation and Reference Systems Service. URL: <http://www.iers.org/>
102. International GNSS Service (IGS). [Electronic resource.] – URL: <https://igs.org/>
103. ISO 19111:2019 «Geographic information - Spatial referencing by coordinates» (Географическая информация – привязка по координатам)
104. ITRF web site. [Electronic resource.] – URL: <http://itrf.ign.fr>. (accessed: 2.10.2020).
105. 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. (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). http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84.pdf
106. National Report for the IAG of the IUGG 2011–2014. / Kaftan V., Malkin Z., Pobedinsky G., Stoliarov I. A., Sermiagin R., Zotov L., Gorshkov V., Shestakov N., Steblov G., Dokukin P., Ustinov A. Ed. by V. P. Savinykh and V. I. Kaftan // Geoinf. Res. Papers, 3, BS1003, GCRAS Publ., Moscow. - 2015 – 99 pp. doi: [10.2205/2015IUGG-RU-IAG](https://doi.org/10.2205/2015IUGG-RU-IAG). - EDN: [UWWFAX](https://www.earth-abstracts.org/abstract/UWWFAX). <http://www.iugg.org/members/nationalreports/>. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1506/1506.09216.pdf>.
107. National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018 / Gerasimenko M., Gorshkov V., Kaftan V., Kosarev N., Malkin Z., Mazurov B., Pasynok S., Pobedinsky G., Popadev V., Savinykh V., Sermyagin R., Shestakov N., Steblov G., Sugaipova L., Ustinov A. Ed. by V. P. Savinikh and V. I. Kaftan // Geoinf. Res. Papers, Vol. 7, No. 1, BS7003, GCRAS Publ., Moscow. – 2019. – 99 pp. - EDN: [WSHTWT](https://www.earth-abstracts.org/abstract/WSHTWT). <https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAG>. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1907/1907.10584.pdf>. <http://www.iugg.org/members/nationalreports/>.
108. National Report for the IAG of the IUGG 2019–2022 / Gorshkov V., Gusev I., Dokukin P., Kaftan V., Malkin Z., Mazurova E., Mikhailov V., Pasynok S., Pobedinsky G., Popadev V., Savinykh V., Shestakov N., Stoliarov I., Sugaipova L., Zotov L. Ed. by V. P. Savinikh and V. I. Kaftan // Geoinf. Res. Papers, Vol. 10, No. 1, BS1002, GCRAS Publ., Moscow. – 2023. – 69 pp. doi: [10.2205/2023IUGG-RU-IAG](https://doi.org/10.2205/2023IUGG-RU-IAG)
109. Organization of the North East Eurasia Reference Frame / V P. Savinykh, V. G. Bykov, A. P. Karpik, B. Moldobekov, G. G. Pobedinsky, G. V. Demianov, V. I. Kaftan, Z. M. Malkin, G. M. Steblov // Международный научно-технический и производственный журнал «Науки о Земле». - 2014. - № 1/2. -с. 16-25. (англ.). - EDN: [SKAELV](https://www.earth-abstracts.org/abstract/SKAELV). http://issuu.com/geo-science/docs/geoscience_1-2-2014. <http://geoscience.ru/?p=776>.
110. Organization of the North East Eurasia Reference Frame, International Association of Geodesy / V P. Savinykh, V. G. Bykov, A. P. Karpik, B. Moldobekov, G. G. Pobedinsky, G. V. Demianov, V. I. Kaftan, Z. M. Malkin, G. M. Steblov // International Association of Geodesy, Scientific Assembly 150th Anniversary of the IAG, Book of Abstracts, September 1-6, 2013, Potsdam, P.308. (англ.). http://www.iag2013.org/IAG_2013/Welcome_files/abstracts_iag_2013_2808.pdf.
111. Reference Frames / Kaftan V., Malkin Z., Mazurova E., Pasynok S., Pobedinsky G., Stoliarov I., Popadiev V V. In: National Report for the IAG of the IUGG 2019–2023 Ed. by V. P. Savinikh and V. I. Kaftan // Geoinf. Res. Papers, Vol. 10, No. 1, BS1002, GCRAS Publ., Moscow. – 2023. – p. 10-30. - doi: [10.2205/2023IUGG-RU-IAG](https://doi.org/10.2205/2023IUGG-RU-IAG)
112. Reference Frames / Kaftan V., Malkin Z., Pasynok S., Pobedinsky G., Popadiev V. In: National Report for the IAG of the IUGG 2015–2018. Ed. by V. P. Savinikh and

- V. I. Kaftan // Geoinf. Res. Papers, Vol. 7, No. 1, BS7003, GCRAS Publ., Moscow. – 2019. – p. 6-24. doi: [10.2205/2019IUGG-RU-IAG](https://doi.org/10.2205/2019IUGG-RU-IAG). – EDN: [JEWLPJ](https://www.edn.org/JEWLPJ).
<http://www.iugg.org/members/nationalreports/>.
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1907/1907.10584.pdf>.
113. Reference Frames / Kaftan V., Malkin Z., Pobedinsky G., Stoliarov I. A. In: National Report for the IAG of the IUGG 2011–2014. Ed. by V. P. Savinikh and V. I. Kaftan // Geoinf. Res. Papers, 3, BS1003, GCRAS Publ., Moscow. - 2015 - p. 8-26. doi: [10.2205/2015IUGG-RU-IAG](https://doi.org/10.2205/2015IUGG-RU-IAG). – EDN: [VVUKHQ](https://www.edn.org/VVUKHQ).
<http://www.iugg.org/members/nationalreports/>.
<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1506/1506.09216.pdf>
114. SC 1.3: Regional Reference Frames. [Electronic resource.] – URL: <http://com1.iag-aig.org/sub-commission-13>. (accessed: 2.10.2020).
115. The International Terrestrial Reference Frame (ITRF). URL: <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>
116. Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux: Analysis and results of ITRF2014. (IERS Technical Note ; 38) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2017. 76 pp., ISBN 978-3-86482-088-5 (print version). [Electronic resource.] – URL: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn38.html>. (accessed: 10.10.2023).

ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1. Геокалькулятор - пересчет координат [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geoproj.ru/>
2. Кредо Транскор 3.2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/197-credo-transkor-naznachenie.html>
3. Лига геодезистов. Программы для геодезии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geo-liga.ru/geo-soft/>
4. Программный центр Полигон. Конвертер координат МСК, СК-42/63, ПЗ-90, WGS-84 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pbprog.ru/ws/csc/>
5. GEOBRIDGE. Пересчет координат (МСК, СК 63, СК 64, СК 47, WGS 84, ПЗ 90) онлайн [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geobridge.ru/proj>
6. LatLong. Пересчет систем координат СК-42, СК-95, ПЗ-90, GPS (WGS-84), ПЗ-90.02, ПЗ-90.11, ГСК-2011, ITRF-2008 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.latlong.ru/sk.php>
7. MapBasic. Пересчёт координат МСК / СК-42 / СК-63 / WGS84 / ПЗ-90 онлайн [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mapbasic.ru/msk-wgs>
8. PHOTOMOD GeoCalculator [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://racurs.ru/program-products/photomod-geocalculator/>

ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Типовые контрольные вопросы к зачету включают:

1. Что означают понятия система отсчёта и отсчетная основа?
2. Какие основные факторы определяют геодезическая система координат?

3. По каким признакам можно классифицировать системы координат?
4. Какие системы координат могут быть объединены общим названием небесные или звездные?
5. Какие системы координат могут быть объединены общим названием земные?
6. В чём различие геоцентрических и топоцентрических координат?
7. В чём различие геоцентрических и квазигеоцентрических координат?
8. Чем определяется положение точки в эллипсоидальной геодезической системе координат?
9. Формулы преобразования эллипсоидальных геодезических координат в пространственные прямоугольные.
10. Формулы преобразования пространственных прямоугольных координат в эллипсоидальные геодезические.
11. Требования к выбору проекций для построения прямоугольных координат на плоскости.
12. Ширина зон в применяемой в России проекции Гаусса-Крюгера. Перекрывание зон.
13. Какие эллипсоиды применялись в системах координат СК-32, СК-42, СК-63, СК-95, МСК, ГСК-2011?
14. Общеземная система координат WGS-84. Принципы ориентации осей координат и положения начала координат.
15. Общеземная система координат WGS-84. Какой организацией США и каким документом она определена? Какие основные характеристики приведены в документе?
16. Общеземная система координат WGS-84. Какие реализации приведены в Документе по стандартизации Национального агентства геопространственной разведки Министерства обороны США NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84 и чем они отличаются?
17. Общеземная система координат ПЗ-90. Принципы ориентации осей координат и положения начала координат.
18. Общеземная система координат ПЗ-90. Какой организацией Российской Федерации и каким документом она определена? Какие основные характеристики приведены в документе?
19. Международная земная система координат (отсчета) ITRS. Принципы ориентации осей координат и положения начала координат.
20. Международная земная система координат (отсчета) ITRS. Какой организацией и каким документом она определена? Какие основные характеристики приведены в документе?
21. Международная земная система координат (отсчета) ITRS. Какие известны реализации и чем они отличаются?
22. Система геодезического обеспечения. Какие виды и уровни она включает?
23. Европейская система координат (European Terrestrial Reference System - ETRS89). Какие известны реализации и чем они отличаются?
24. Система координат США (National Spatial Reference System – NSRS). На пунктах каких сетей она базируется и чем они отличаются?

25. Система координат Канады. Принципиальные отличия от системы координат США.
26. Система координат Австралии (Geocentric Datum of Australia – GDA). Какие основные причины ее введения?
27. Система координат Китая (China Geodetic Coordinate System CGCS2000). На пунктах каких сетей она базируется и чем они отличаются?
28. Система координат Российской Федерации (Геодезическая система координат 2011 года – ГСК-2011). Какой организацией и каким документом она установлена? Какие основные характеристики приведены в документе?
29. Система координат Российской Федерации (Геодезическая система координат 2011 года – ГСК-2011). На пунктах каких сетей она базируется и чем они отличаются?
30. Какие нормы плотности размещения пунктов государственных нивелирных, геодезических и гравиметрических сетей действуют на территории Российской Федерации? Основные требования норм плотности.
31. На чем основана современная технология геодезического обеспечения потребителей для определения местоположения?
32. Примеры региональных систем координат.
33. Европейская система координат (European Terrestrial Reference System - ETRS89) и национальные системы координат государств Европейского союза. Чем они отличаются?
34. Система координат 1963 года (СК-63). Какие основные причины ее введения? Какие основные причины ее отмены?
35. Система координат 1963 года (СК-63). На пунктах каких сетей она базировалась?
36. Система координат 1963 года (СК-63). На каком эллипсоиде она базируется и какая ширина зон проекции Гаусса-Крюгера? Точности какого масштаба топографических карт она соответствовала?
37. Местные системы координат. Цель создания. Определение и основные параметры.
38. Каким документом регламентируется порядок установления местных систем координат? Какие основные требования к местным системам координат?
39. Местные системы координат субъектов Российской Федерации. Какие основные причины их введения?
40. Местные системы координат субъектов Российской Федерации. Каким документом они были установлены? На пунктах каких сетей они базируются?
41. Местные системы координат субъектов Российской Федерации. На каком эллипсоиде они базируются и какая ширина зон проекции Гаусса-Крюгера?
42. Местные системы координат субъектов Российской Федерации. Сколько зон в местной системе координат Нижегородской области МСК-52? Какие осевые меридианы в МСК-52?
43. Какие основные погрешности местных систем координат?
44. Преобразование прямоугольных геоцентрических координат в геодезические эллипсоидальные координаты.

45. Преобразование геодезических эллипсоидальных координат в прямоугольные геоцентрические координаты.
46. Преобразование плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса-Крюгера в геодезические эллипсоидальные координаты.
47. Преобразование геодезических эллипсоидальных координат в плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса-Крюгера.
48. Преобразование прямоугольных геоцентрических координат из одной системы в другую.
49. Преобразование плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса-Крюгера из одной системы в другую.
50. Каким документом регламентируется порядок и параметры преобразования прямоугольных геоцентрических координат из одной системы в другую?
51. Каким документом регламентируется порядок и параметры преобразования прямоугольных геоцентрических координат в геодезические эллипсоидальные координаты?
52. Какие 7 параметров преобразования прямоугольных геоцентрических координат вы знаете? Чьим именем назван метод преобразования по 7 параметрам?
53. Приведите примеры трехмерного, двумерного и одномерного преобразования?
54. Геопотенциальные числа.
55. Высоты геодезические.
56. Высоты ортометрические.
57. Высоты динамические.
58. Высоты нормальные.
59. Балтийская система высот.
60. Европейская система высот EVRS и ее реализация EVRF.
61. Международная система высот ITRS.
62. Какие приближенные параметры преобразования можно определить для двух плоских прямоугольных систем координат?
63. Сколько пунктов с известными координатами в двух системах необходимо для определения приближенных параметров преобразования для двух плоских прямоугольных систем координат?
64. Какие основные нормативные акты регламентируют вопросы государственной тайны?
65. Каким нормативным актом определен перечень государственных органов и организаций, наделенных полномочиями по распоряжению сведениями, отнесенными к государственной тайне?
66. Какие существуют степени секретности сведений, составляющих государственную тайну?
67. Какие виды ответственности за нарушение законодательства Российской Федерации о государственной тайне?
68. Кто выдает заключение о наличии в результатах геодезических и картографических работ сведений, составляющих государственную тайну?
69. Кто утверждает Перечень сведений, подлежащих засекречиванию, действующий в федеральном органе исполнительной власти, осуществляющем

функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере геодезии и картографии?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения учебного пособия студент получает основные сведения о дисциплине «Математические методы обработки и анализа геопространственных данных на ЭВМ», включая: темы разделов и занятий, рекомендуемую для изучения литературу, Интернет-ресурсы, используемое программное обеспечение, типовые контрольные вопросы.

В результате изучения дисциплины студент познакомится со скриптовым языком высокого уровня, методами обработки и анализа геопространственных данных, с основными алгоритмами обработки и анализа, получит программные средства и примеры кодов.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ И ТЕМЫ ЗАНЯТИЙ.....	3
1. Введение.....	4
Вопросы терминологии	4
Классификация систем координат	10
Общие сведения о звездных (небесных) и земных системах координат	12
Звездные (небесные) системы координат.....	12
Земные системы координат.....	15
Соотношения между некоторыми системами координат.....	17
2. Геодезические системы координат	19
Общеземная система координат	22
Топоцентрическая система координат.....	23
Переход к общеземной системе координат	25
Система координат в плоскости геодезической проекции.....	26
3 Глобальные (общеземные) системы координат.....	28
Общеземная система координат WGS 84	31
Общеземная система координат ПЗ-90.....	34
Международная земная система координат (отсчета) ITRS.....	36
4 Континентальные и национальные системы координат.....	39
Континентальные системы координат.....	42
Национальные системы координат	45
Национальная система координат США - NSRS.....	45
Национальная система координат Канады - CSRS.....	46
Национальная система координат Австралии - GDA	46
Национальная система координат Китая - CGCS.....	47
Национальная система координат России – ГСК-2011.....	48
Геодезическое обеспечение потребителей в континентальных и национальных системах координат.....	53
5 Региональные и местные (локальные) системы координат.....	56
Региональные системы координат	61
«Губернские триангуляции» XVIII в.	61
Местные системы координат субъектов Российской Федерации.....	61
Местные (локальные) системы координат	66

6 Методы преобразования координатных систем и параметры перехода	75
Преобразование одной координатной системы в другую координатную систему разного типа (геоцентрических прямоугольных координат в геодезические эллипсоидальные и обратно).....	76
Преобразование пространственных прямоугольных и геодезических эллипсоидальных координат одной координатной системы в другую координатную систему того же типа с использованием точно определенных параметров перехода (трехмерное преобразование)	77
Преобразование координат на заданную эпоху.....	81
Преобразование пространственных геодезических эллипсоидальных координат в плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса-Крюгера и обратно с использованием точно определенных параметров перехода (трехмерное и двумерное преобразование) для эллипсоида Красовского	82
Преобразование пространственных геодезических эллипсоидальных координат в плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса-Крюгера и обратно с использованием точно определенных параметров перехода (трехмерное и двумерное преобразование) для произвольного эллипсоида	84
Преобразование координат из одной плоской прямоугольной системы координат в другую аналогичную в проекции Гаусса-Крюгера с использованием точно определенных параметров перехода (двумерное преобразование) для общего эллипсоида	85
7. Системы высот	88
Принципы определения высоты в гравитационном поле.....	88
Геодезическая, ортометрическая, нормальная и динамическая высоты.....	92
Исторические сведения о нивелировании	95
Государственная система высот	103
Система высотного обеспечения Российской Федерации.....	104
Вопросы установления европейской и единой общеземной систем высот	110
8 Определение параметров преобразования координатных систем и некоторые вопросы государственной тайны в сфере геодезии, картографии, ДЗЗ	117
Определение параметров преобразования координатных систем.....	117
Вопросы государственной тайны в сфере геодезии, картографии, ДЗЗ	118
Закон Российской Федерации «О государственной тайне»	119
Полномочия органов государственной власти и должностных лиц в области отнесения сведений к государственной тайне и их защиты.	119
Перечень сведений, составляющих государственную тайну	119
Сведения, не подлежащие отнесению к государственной тайне и засекречиванию	120
Порядок отнесения сведений к государственной тайне	120

Порядок засекречивания сведений и их носителей.....	120
Порядок рассекречивания сведений	121
Ответственность за нарушение законодательства Российской Федерации о государственной тайне.....	121
Указ Президента Российской Федерации «Об утверждении Перечня сведений, отнесенных к государственной тайне».....	121
Правила отнесения сведений, составляющих государственную тайну, к различным степеням секретности	123
Порядок подготовки заключений о наличии в результатах геодезических и картографических работ сведений, составляющих государственную тайну.....	123
Перечень сведений, подлежащих засекречиванию, действующий в федеральном органе исполнительной власти, осуществляющем функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере геодезии и картографии	124
ПЕРЕЧЕНЬ РЕКОМЕНДУЕМОЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
Основные.....	125
Дополнительные.....	128
ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	135
ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СОДЕРЖАНИЕ	140

