

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,

	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.	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.
--	--	---

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

Геодезические координаты D. Geodatische Koordinaten E. Geodetic coordinates F. Coordonnees geodesiques	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
Геоцентрические координаты D. Geozentrische Koordinaten E. Geocentric coordinates F. Coordonnees geocentriques	Величины, определяющие положение точки в системе координат, у которой начало совпадает с центром масс Земли
Плоские прямоугольные геодезические координаты	Прямоугольные координаты на плоскости, на которой отображена по определенному математическому закону

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 аппликат 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).

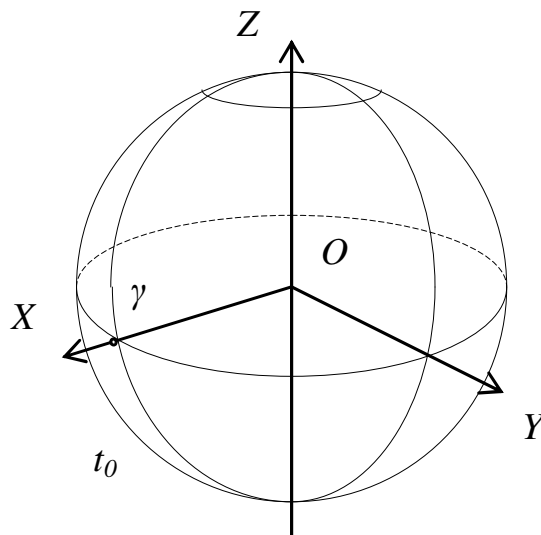


Рис. 1. Прямоугольная геоцентрическая экваториальная звездная система координат

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 гармоник

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).

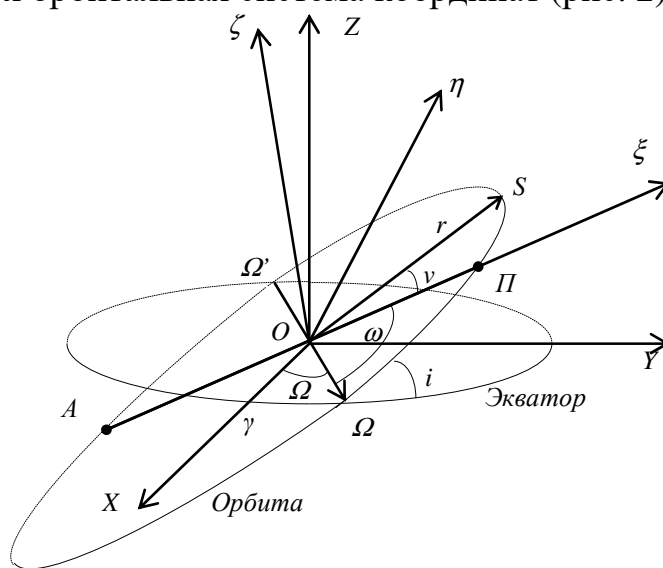


Рис. 2. Элементы орбитальной системы координат

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 полусферы 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: перицентра P (точка перигея) и апоцентра A (точка апогея). Угол между направлениями на восходящий узел Ω и перицентр P , отсчитанный от Ω по направлению движения ИСЗ, называется аргументом перицентра и обозначается символом ω . Угол i между плоскостью экватора и плоскостью орбиты называется наклоном орбиты. Угловое удаление спутника S от оси перицентра 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 перицентра. Его ещё называют динамическим элементом.

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

- ζ – перпендикулярна плоскости орбиты;
- ξ – проходит через перицентр;
- 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 референсная (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).

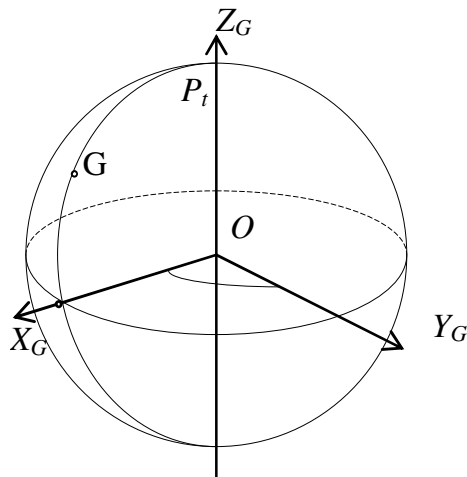


Рис. 3. Средняя общеземная гринвичская система координат

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):

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

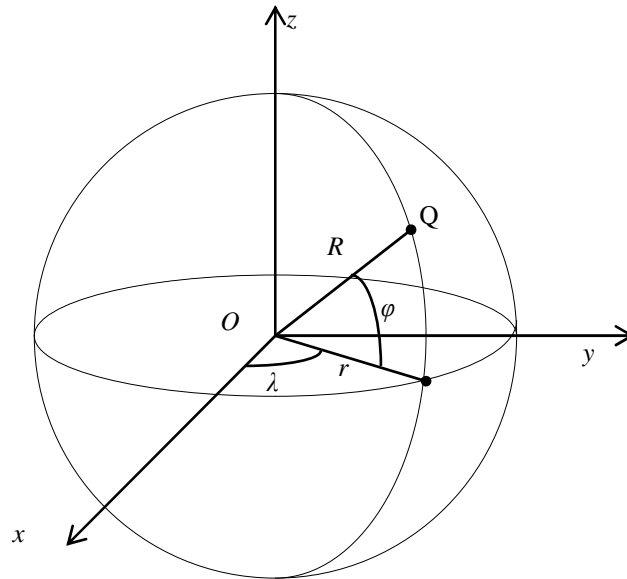


Рис. 4. Прямоугольные и сферические системы координат

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

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

где e - эксцентриситет эллипсоида.

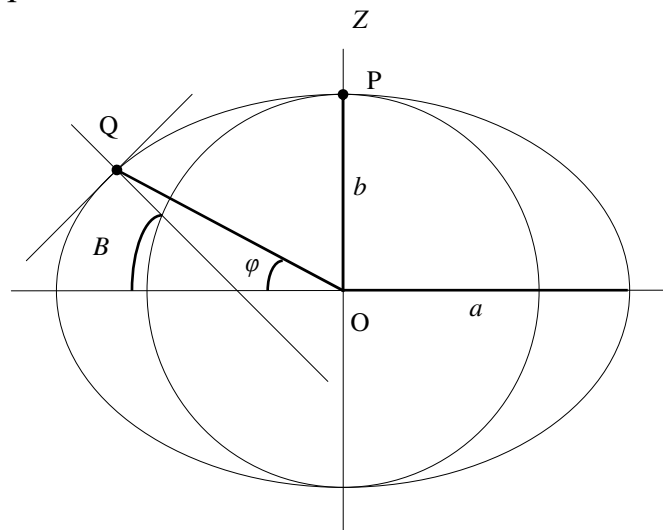


Рис. 5. Эллипсоидальная и геоцентрическая широта

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

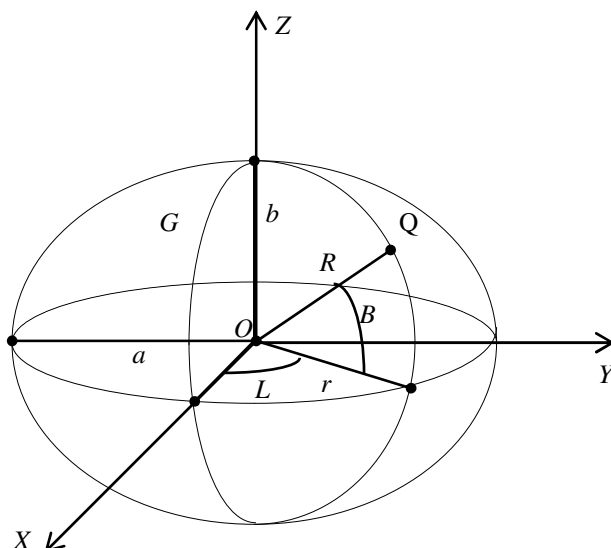


Рис. 6. Прямоугольные и эллипсоидальные системы координат

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

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.