

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КАРТ

### ВВЕДЕНИЕ. СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА КООРДИНАТ И ВРЕМЕНИ

**Начальные установки.** Учебной программой по дисциплине “Геодезические основы карт” на лекции отводится 18 часов – 9 лекций. На семинары и практические занятия учебной программой предусмотрено в два раза больше времени – 36 часов. Основной упор делается на самостоятельное изучение дисциплины – 54 часа. Поэтому в каждой приводимой ниже лекции материала больше, чем это можно изложить за два академических часа. Собственно говоря, каждая лекция – это самостоятельная тема. 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 решению тестов по проверке усвоения материала, к выполнению практических занятий, оформлению и сдаче выполненных практических работ, к подготовке обстоятельных рефератов и презентаций по ним. В конечном счёте – к подготовке к экзамену. Позвольте пожелать Вам успеха в изучении этой важной дисциплины!

**Содержание курса. Учебные пособия.** Курс называется “Геодезические основы карт”. В соответствии с ГОСТ по картографическим терминам и определениям [11, п. 91]

|| **Геодезическая основа карты** (кратко - **геодезическая основа**) - это совокупность геодезических данных, необходимых для создания карты.

Обычно эта дисциплина опирается на разделы высшей геодезии и обязательно содержит материал по созданию и закреплению на местности опорных геодезических сетей.

Одним из ранних учебных пособий для студентов-картографов была книга Б.Н. Рабиновича “Основы построения опорных геодезических сетей”, 1948 г. В 1954 г. вышло её второе издание. Учебное пособие составлено с учетом мнений выдающихся ученых: Ф.Н. Красовского, А.А. Изотова, П.С. Закатова, К.А. Салищева и др. В книге излагаются вопросы высшей геодезии и практической астрономии. Рассмотрены методы и приборы высокоточных базисных, угловых и нивелирных измерений. Основной упор делался на теорию и практику построения в СССР государственных геодезических сетей.

В 1975 г. в МГУ имени М.В. Ломоносова издано учебное пособие А.П. Тищенко “Геодезические основы карт”, а в 1984 г. в МИИГАиК – учебник З.С. Хaimова “Основы высшей геодезии” для студентов картографической специальности. В этих работах учитывались новейшие достижения в области геодезии, актуальные и для картографии.

В последние десятилетия произошли принципиальные изменения в геодезии и картографии. В практику вошли глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС). Создаваемые при их помощи высокоточные векторные геодезические сети практически вытеснили традиционные методы триангуляции, полигонометрии и трилатерации. В картографии классические методы создания и использования географических карт уступили место геоинформационным технологиям. В практику вошли географические информационные системы. Компьютер и его окружение оказались в центре внимания картографов. Цифровые пространственные данные, которые заносятся в компьютер и хранятся в базах данных, должны иметь пространственную привязку в той или иной координатной системе отсчета. Поэтому земные системы отсчета и математические операции с координатами разных систем стали важнейшей частью дисциплины “Геодезические основы карт”. На географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова издан ряд новых учебных пособий, которые подготовил проф. Б.Б. Серапинас: “Геодезические основы карт”, 2001 г., “Практикум по геодезическим основам карт”, 2008 г., “Основы спутникового позиционирования”, 2012 г.

Существенное влияние на содержание данного курса и последовательность его изложения имели кардинальные решения 24-й Генеральной ассамблеи Международного астрономиче-

ского союза (*IAU*) 2000 г. по небесным и земным координатным системам отсчёта и системам счёта времени. Основное содержание Лекции 1 – системы отсчёта координат и времени.

**Небесные и земные системы отсчёта.** Международный астрономический союз *IAU* (*International Astronomical Union*) в 2000 г. конкретизировал понятия о системах отсчёта для Земли и для Солнечной системы [29, 30]. В рамках общей теории относительности рассмотрены *системы отсчёта*, иначе *опорные системы* (англ. *reference system*). Они образуют концептуальную базу определения положения и движений объектов в пространстве и во времени. Их практической реализацией являются *отсчётные (опорные) основы* (англ. *reference frame*) – каталоги координат позиций и параметры движений физически закреплённых точек; на земной поверхности этим точкам соответствуют пункты опорных геодезических сетей. В примечании ниже приведены эти определения на языке оригинала<sup>1</sup>.

Итак, система отсчёта – это *теоретическая концепция*, содержащая представления о системах счёта координат и времени, о параметрах Земли, необходимых для их введения, и соображения по установлению этих систем в рассматриваемом пространстве.

Результатом практической реализации этой концепции является закреплённая в пространстве *отсчетная основа*. В случае наземных измерений это опорная геодезическая сеть, пункты которой определены в выбранной системе координат, созданы каталоги координат  $\mathbf{R}_{t_1}$  на эпоху  $t_1$ , а также определены скорости изменения координат  $\dot{\mathbf{R}}_{t_1}$ <sup>2</sup>. По этим данным можно вычислить координаты на эпоху  $t_2$ :

$$\mathbf{R}_{t_2} = \mathbf{R}_{t_1} + (t_2 - t_1)\dot{\mathbf{R}}_{t_1}.$$

Международный астрономический союз *IAU* установил ряд небесных и земных систем пространственно-временного отсчёта. Кратко перечислим эти системы, ориентируясь на международное их понимание и толкование (рис. 1).

- **Барицентрическая небесная система отсчета BCRS** (*Barycentric Celestial Reference System*) предназначена для установления в рамках общей теории относительности пространственно-временных координат для Солнечной системы.
- **Международная небесная система отсчёта ICRS** (*International Celestial Reference System*) – конкретная реализация BCRS. Её начало, барицентр, находится в центре масс Солнечной системы. Координатные оси зафиксированы в пространстве относительно координат удаленных внегалактических радиоисточников, собственные движения которых практически не наблюдаются. Координатная система не зависит от эпохи и положений эклиптики или экватора.
- **Международная небесная отсчетная основа ICRF** (*International Celestial Reference Frame*). Практическая реализация ICRS, представляет собой каталог позиций сотен внегалактических радиоисточников, закрепляющих положения координатных осей системы; основана на данных фундаментальных каталогов и наблюдений, выполненных методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой - РСДБ.

<sup>1</sup> **Reference system:** theoretical concept of a system of coordinates, including time and standards necessary to specify the bases used to define the position and motion of objects in time and space [30].

**Reference frame:** 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 [30].

<sup>2</sup> Изменения координат вектора  $\mathbf{R}_{t_1}$  обусловлены скоростью изменения (1) начала координат  $\mathbf{R}_0$ , (2) различия линейных масштабов  $\mathbf{m}$  и (3) матрицы углов поворота координатных осей  $\mathbf{W}$ :

$$\dot{\mathbf{R}}_{t_1} = \dot{\mathbf{R}}_0 + \dot{\mathbf{m}}\mathbf{R}_{t_1} + \dot{\mathbf{W}}\mathbf{R}_{t_1}.$$

Relationship between TRS's. URL: [http://itrf.ensg.ign.fr/rel\\_trs.php](http://itrf.ensg.ign.fr/rel_trs.php) (дата обращения 01.06.2015).

- **Геоцентрическая небесная система отсчета GCRS** (*Geocentric Celestial Reference System*). Геоцентрическая система пространственно-временных координат в рамках общей теории относительности. Небесные системы *BCRS* и *GCRS* взаимосвязаны, их соответствующие координатные оси параллельны и неподвижны относительно вне-галактических радиоисточников. Система не участвует в суточном вращении Земли.
- **Геоцентрическая земная система отсчета GTRS** (*Geocentric Terrestrial Reference System*). Геоцентрическая система пространственно-временных координат в рамках общей теории относительности. Участвует в суточном вращении Земли. Земная система *GTRS* взаимосвязана с небесной системой *GCRS*. Она введена взамен *Условной земной системы отсчета CTRS* (*Conventional Terrestrial Reference System*).
- **Международная земная система отсчета ITRS** (*International Terrestrial Reference System*). Специфический представитель *GTRS*. Именно *ITRS* рекомендуется для определения позиций и параметров движений объектов на Земле и в околосземном пространстве. Это полноценная международная геоцентрическая система координат. Поддерживается Международной службой вращения Земли *IERS*, и в мире является основной. Служба *IERS* создана в 1987 г. Международным астрономическим союзом *IAU* и Международным союзом геодезии и геофизики *IUGG* [31]. Начало её работы – 1 января 1988 г. При сохранении аббревиатуры *IERS* она в 2003 г. переименована в Международную службу вращения Земли и земных систем отсчёта (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*).
- **Международная земная отсчетная основа ITRF** (*International Terrestrial Reference Frame*). Практическая реализация *ITRS*. Ежегодно новейшими методами космической геодезии формируется и уточняется координатная основа. Используются технологии: 1) наблюдения внегалактических точечных радиоисточников методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой – РСДБ (*VLBI - Very Long Baseline Interferometry*), 2) позиционирования системами ГЛОНАСС и *GPS*, 3) лазерной локации Луны (*LLR - Lunar Laser Ranging*), 4) лазерной локации искусственных спутников Земли (*SLR - Satellite Laser Ranging*) и 5) измерения доплеровской спутниковой системой ДОРИС (*DORIS - Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*). В мире построено около 4000 пунктов *ITRF*. Вследствие геодинамических процессов, координаты пунктов изменяются в среднем со скоростью  $\sim 2\text{--}4 \text{ см/год}$ , в отдельных регионах даже быстрее. Поэтому координаты постоянно обновляются, а в каталогах указывается год их реализации. Например, координатная отсчётная основа эпохи 1989 г. будет обозначена как *ITRF-89*. С 1988 по 2008 гг., за исключением 1995 г., реализовано 12 вариантов: с *ITRF-88* по *ITRF-2008*. На сайте [32] имеются параметры, относящиеся к разным версиям Международной земной отсчётной основы *ITRF*.
- **Небесная промежуточная система отсчета CIRS** (*Celestial Intermediate Reference System*) и **Земная промежуточная система отсчета TIRS** (*Terrestrial Intermediate Reference System*). Это геоцентрические системы отсчета. Их объединяет единый *небесный промежуточный полюс CIP* (*Celestial Intermediate Pole*). Полюсу *CIP* соответствует *небесный промежуточный экватор*. Действуют с 1 января 2003 г. Введены для взаимосвязи *GCRS* и *ITRS*. Полюс *CIP* близок к истинному (мгновенному) полюсу. Он движется относительно полюса *ITRS* вследствие перемещений оси вращения в теле Земли и перемещается относительно полюса *GCRS* из-за прецессии и нутации.

Промежуточные системы введены с учётом того, что результаты наблюдений, выполняемые при помощи РСДБ, ГНСС и других современных средств, практически не зависят от погрешностей, обусловленных использованием в прежних небесных системах отсчёта экватора, эклиптики и точки весеннего равноденствия.

На промежуточном экваторе установлены так называемые «невращающиеся начала отсчёта» (*non-rotating origin*): *небесное промежуточное начало CIO (Celestial Intermediate Origin)* и *земное промежуточное начало TIO (Terrestrial Intermediate Origin)*.

В настоящее время точка *CIO* очень близка к нулевому меридиану *GCRS* и в промежутке 1900-2100 гг. останется в этом положении.

Точка *TIO*, начало счёта долгот в земной системе *TIRS*, очень близка к нулевому меридиану *ITRS* и в промежутке 1900-2100 гг. останется в этом положении.

Полюс *CIP*, точки на его экваторе *TIO* и *CIO* обозначают меридианы в промежуточных системах. Угол, измеряемый по промежуточному экватору между этими точками, определяет *угол вращения Земли ERA (Earth Rotation Angle)*. Этот угол объединяет меридианы небесных и земных нулевых долгот.

Для трансформирования координат из *ITRS* в *GCRS* необходимо знать положение полюса *CIP* в *GCRS*, положение полюса *CIP* в *ITRS* и угол вращения Земли *ERA*.

Введением полюса *CIP* отменяется ранее применявшийся *небесный эфемеридный полюс CEP (Celestial Ephemeris Pole)* [28, 29]..

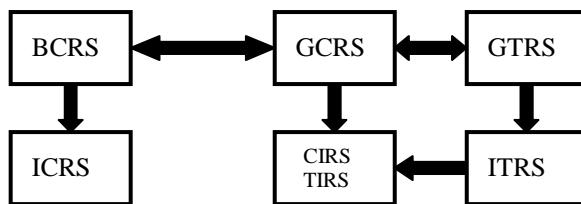


Рис. 1. Взаимосвязи небесных и земных систем отсчёта

**Геоцентр.** Во многих небесных и земных системах начало координат располагается в центре масс Земли – *геоцентре*. Такие координаты называют геоцентрическими. При этом учитывается стабильность геоцентра и движения земной оси в теле Земли и относительно звёзд. Оценки стабильности геоцентра определены по результатам наблюдений внегалактических точечных радиоисточников, по данным лазерной локации искусственных спутников Земли, измерений системами ГЛОНАСС, GPS и др. Эти исследования показывают, что смещения геоцентра колеблются от нескольких миллиметров до первых сантиметров [26]. Колебания носят сложный характер, но преобладают годовые и полугодовые гармоники, отражающие приливные явления [3].

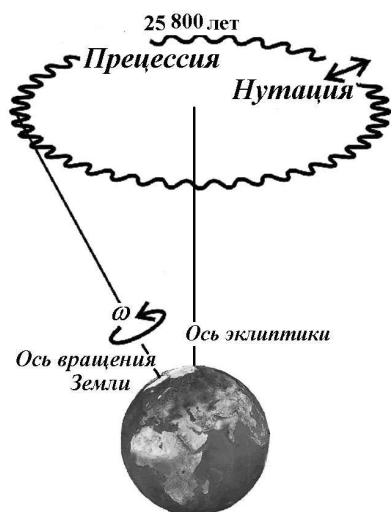


Рис. 2. Прецессия и нутация земной оси;  $\omega$  - угловая скорость вращения Земли; ось эклиптики – перпендикуляр к плоскости орбиты Земли

учтывается стабильность геоцентра и движения земной оси в теле Земли и относительно звёзд. Оценки стабильности геоцентра определены по результатам наблюдений внегалактических точечных радиоисточников, по данным лазерной локации искусственных спутников Земли, измерений системами ГЛОНАСС, GPS и др. Эти исследования показывают, что смещения геоцентра колеблются от нескольких миллиметров до первых сантиметров [26]. Колебания носят сложный характер, но преобладают годовые и полугодовые гармоники, отражающие приливные явления [3].

**Прецессия** (от лат. *praececcio* – опережающее движение). Из-за эллипсоидальности и наличия экваториального избытка масс материальные точки Земли, расположенные ближе к Луне и Солнцу, испытывают притяжение более сильное, нежели удаленные от них точки. 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 (рис. 2). Эти перемещения напоминают

круговые движения оси вращающегося волчка. Осью конуса является ось эклиптики – перпендикуляр к плоскости земной орбиты. Полюс Мира перемещается на небесной сфере по окружности, угловой радиус которой равен  $23^\circ 26'$  и меняется за тысячелетия от  $21^\circ 58'$  до

24°36'. В наше время северной полярной является звезда  $\alpha$  созвездия Малой Медведицы. 4500 лет назад над северным полюсом была звезда  $\alpha$  из созвездия Дракона. Через 2000 лет полярными станут звезды созвездия Цефей, а через 12 000 – звезды созвездия Лиры (рис. 3) [22]. Прецессию открыл во II в. до н. э.

греческий астроном Гиппарх. Ее сущность объяснил Ньютона.

**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 года, 1/2 года, 27,32 суток, 13,66 суток и т.д. Амплитуда гармоника периода 18,67 лет не превышает 9''. Явление нутации и ее главный период открыл английский астроном Дж. Брадлей (1726-1747).

**Движение земных полюсов.** Ось вращения не занимает неизменного положения в теле Земли. Это явление известно как *движение полюсов Земли*.

Движения полюсов были предсказаны ещё Л. Эйлером, обнаружены в Пулковской обсерватории астрономом М. Нюреном, исследованы немецким астрономом Ф. Кюстнером, американским астрономом С. Чандлером и др. Движение мгновенной оси вращения Земли имеет сложный периодический характер, и обусловлено влиянием упругих и вязких свойств литосферы, действием земных, морских и океанических приливов, вызываемых притяжением

Солнца и Луны, сезонных изменений нагрузки на поверхность Земли из-за дождя, нарастания и таяния снегового и ледового покрова, сброса растениями листвы, изменения массы и уровня грунтовых вод, перемещений масс атмосферы и масс воды в океанах. Перемещения полюса происходят вокруг своего среднего положения по спиралеподобной траектории, называемой *полодией*, не выходящей из квадрата со сторонами 20 м. Так называемый период Чандлера составляет ~428-435 суток; амплитуда колебаний ~6 м, а её суточные изменения ~5 см.

Наряду с периодическими колебаниями наблюдается поступательное движение Северного полюса со скоростью

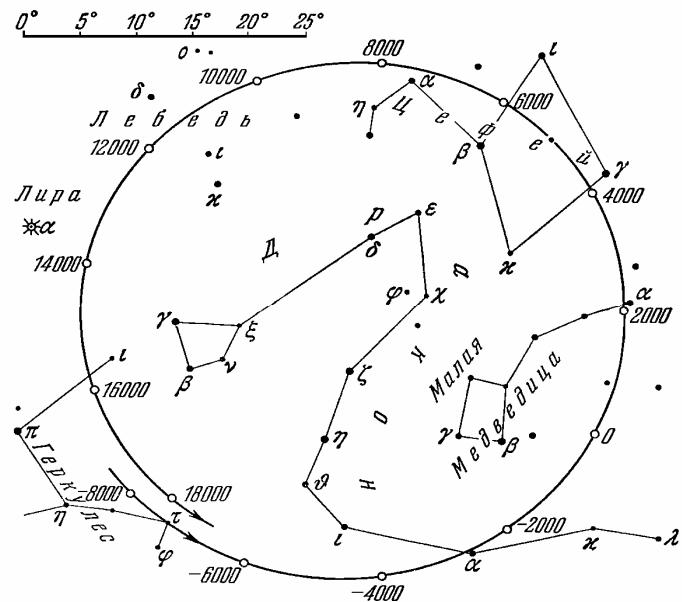


Рис. 3. Перемещения северного полюса среди звёзд из-за прецессии (вид с Земли) [22]

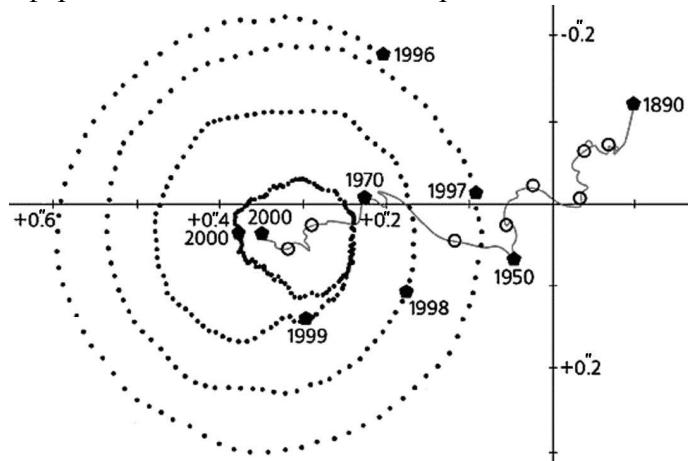


Рис. 4. Движения Северного полюса; периодические – точечные линии, поступательные – сплошная линия

~0,1 м/год в направлении меридианов с западной долготой 70-80° (рис. 4).

Поэтому координатная ось  $Z$  ориентируется по линии, соответствующей положению земной оси в некоторую эпоху. Этим задаётся экватор и устанавливается единый счёт широт. Введением начального меридиана определяется единый счёт долгот.

**Международная ГНСС служба IGS.** Большой вклад в изучение Земли и развитие координатных систем отсчёта вносит сеть станций службы *IGS* (*International GNSS Service*) [4, 13, 34-37]. Активная её деятельность началась в 1994 г. Работу *IGS* поддерживают на добровольной основе свыше 200 организаций мира.

В службу *IGS* входят станции непрерывного слежения, а также центры сбора и центры анализа данных. На станциях слежения приёмниками *GPS*/ГЛОНАСС собираются «сырые» данные. Их передают в операционные центры для перевода в формат обмена *RINEX*. После этого их отправляют в региональные центры, а затем и в глобальные центры. Операционные центры имеются в Европе (Германия, Италия, Нидерланды, Франция), Америке (США, Канада), Азии (Япония), Африке (ЮАР), Австралии. На данный момент их 17. Имеется 6 региональных центров (Австралия, Европа, США), 4 глобальных центра – два в США, по одному во Франции и в Корее, и 10 центров анализа данных (Германия 2, Чехия 1, Швейцария 1, Канада 1, США 5).

Работают два глобальных центра по развитию международной отсчётной основы *ITRF* (Великобритания и США) и 18 центров по развитию региональных геодезических основ (14 в странах Европы, по одному в Австралии, Канаде, США и Японии).

Служба *IGS* собирает, архивирует и распространяет уточненные эфемериды спутников *GPS* и ГЛОНАСС, параметры вращения Земли, координаты и скорости смещения станций *IGS*, поправки в шкалы времени спутниковых станций, оценки задержек сигналов в атмосфере и др. Данные *IGS* используются также для построения опорных геодезических сетей, при этом для обмена данными служит специальный формат *SINEX*.

В 2011 г. *IGS* создала собственную новую отсчетную основу *IGS-08*, базирующуюся исключительно на переработанных данных *GNSS*-наблюдений и *ITRF-2008*.

**Земные координатные системы отсчёта.** Они представляют особый интерес: ведь процесс измерений выполняется в установленной на Земле *системе отсчета* [14, 23, 24].

Земные системы отсчета классифицируют по территориальному охвату, выделяя глобальные (общеземные), региональные (объединяют несколько государств), национальные (государственные) и местные. Они реализуются в ходе сотрудничества многих стран (международные), стран отдельного региона (региональные), силами одного государства (общеземные, национальные), или силами отдельных организаций (местные). Примером общеземной международной системы является *ITRS* и её отсчётная основа *ITRF* [32].

Созданы также *общеземные системы отсчёта* для обеспечения работ ГНСС.

- **Мировая геодезическая система WGS-84** (*World Geodetic System, 1984*) и её геоцентрическая геодезическая сеть **G-1150**. Она обеспечивает работу *GPS*. Ей предшествовали более ранние варианты. Усилиями армии США на базе астрономо-геодезических, гравиметрических и спутниковых измерений создана модель *WGS-60*, а затем модели *WGS-66* и *WGS-72*. При этом *WGS-72* уже опирались на данные Мировой спутниковой триангуляционной сети и доплеровские измерения *TRANSIT*. В начале 1980-х годов появилась новая система геодезических параметров *GRS-80* [33]. Получены также новые результаты лазерной локации спутников, интерферометрии со сверхдлинной базой, спутниковой альтиметрии и др. В результате образована модель *WGS-84* [21].

Отсчетная основа *WGS-84* установлена в 1987 г. Её дальнейшие улучшения производились благодаря обширным *GPS* измерениям. В 1994 г. усовершенствования геодезической основы *WGS-84* пришлись на начало 730-ой *GPS*-недели. Она получила обозначение *G-730*. В 1996 г. с началом 873-ой *GPS*-недели создана новая усовершенствованная геодезическая основа *G-873*. Она стала очень близкой к *ITRF-96*. В 2002 г. произведено третье уточнение – *G-1150*. По среднему квадратическому критерию различия между координатами *WGS-84* (*G-1150*) и *ITRF-2000* составляют ~1 см. На этом

уровне точности отсчетные основы *WGS-84* и *ITRF* одинаковы. В настоящее время по составу параметров *ITRS* и *WGS-84* практически идентичны [4].

- **Общеземная система отсчёта Параметры Земли ПЗ-90.** Система отсчета создана в России без интеграции с западными странами. Её координаты закреплены пунктами Космической геодезической сети КГС, которая создана по фотографическим, доплеровским, дальномерным и альтиметрическим наблюдениям геодезических спутников ГЕОИК-1, ЭТАЛОН, ГЛОНАСС и др. Первоначально КГС имела 26 пунктов на территории СССР и 7 пунктов в Антарктиде. Погрешность взаимного положения пунктов при расстояниях между ними до 10 000 км не более 30 см.

ПЗ-90 постановлением правительства РФ с 2002 г. введена в качестве единой государственной системы отсчета в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов КА и решения навигационных задач. В ней работала ГЛОНАСС. По распоряжению правительства России от 2007 г. спутники ГЛОНАСС были переведены на новую уточнённую версию ПЗ-90.02. Она довольно близка к системам *ITRF-2000* и *WGS-84*. Отличалась от них лишь сдвигом начала координат примерно на 0,4 м.

Следующая уточненная версия введена постановлением правительства от 28 декабря 2012 г. Обозначается как ПЗ-90.11. Эта система отсчёта опирается на пункты государственной геоцентрической геодезической сети РФ 2011 г. [2, 4-7, 9, 13, 18-20]. По уровню точности, ориентации осей координат и положению их начала ПЗ-90.11 соответствует *ITRS* и *ITRF* [1].

- **Отсчётная земная основа европейской спутниковой системы Галилео GTRF** (*Galileo Terrestrial Reference Frame*) изначально тождественна *ITRF* и является подсистемой *ITRS*.
- Интерес представляет также отсчётная основа спутников КНР *Бэйдоу/Compass* [38].

Ниже приведены примеры земных систем отсчёта регионального уровня.

- **Европейская земная система отсчета ETRS** (*European Terrestrial Reference System*) и отсчетная основа *ETRF* (*European Terrestrial Reference Frame*). Пункты сети установлены посредством высокоточных и непрерывных наблюдений спутников GPS/ГЛОНАСС. Эта региональная система отсчета является подсистемой *ITRS* и очень близка к *WGS-84*. Система объединяет все геодезические сети Европы, включая сети стран Балтии и Турции. В рамках системы *ETRS* имеет место Европейская постоянно действующая геодезическая сеть *EPN*. Введена также единая система счета высот на базе двух нивелирных сетей континентального уровня – центральноевропейских и западноевропейских государств в Амстердамской 1973 г. системе высот и государств бывшего СССР и Восточной Европы в Балтийской системе высот 1977 г. [2, 12].
- **Североамериканская система NAD-83** (*North American Datum, 1983*). Современная региональная система отсчета плановых координат *NAD-83* пришла на смену устаревшей системе *NAD-27* (*The North American datum, 1927*), установленной на эллипсоиде Кларка 1866 г. с исходным пунктом *Meades Ranch* в штате Канзас. Высота геоида в исходном пункте была принята равной нулю. Отсчётная система *NAD-83* на основе параметров *GRS-80* устанавливает единую систему координат для США, Канады, Мексики и стран Центральной Америки. Она основана на геодезической сети из 250 000 пунктов, включая 600 доплеровских станций. Ее точность повышена современными измерениями *GPS*-приемниками. Прямоугольные координаты пунктов *NAD-83* близки к их значениям в системе *WGS-84*.
- **Североамериканская система высотных дат NAVD-88** (*North American vertical datum, 1988*). Введена взамен устаревшей 1929 г. высотной основы *NGVD-29* (*The na-*

*tional geodetic vertical datum, 1929*). При этом общая нивелирная сеть была увеличена примерно на 625 000 км. Новая высотная опора установлена на основе обработки (уравнивания) нивелирных сетей Канады, Мексики и США.

- **Австралийская система — GDA-94** (*Geocentric Datum of Australia, 1994*). Геоцентрическая система координат, принятая для всей Австралии. Построена на основе отсчётной основы *ITRF-92* и отнесена к эпохе 1 января 1994 г.

Все координатные системы регионального уровня входят в виде подсистем в общеземную систему *ITRS* или *WGS-84*. Центры пунктов, закреплённые в верхнем слое земной коры, вследствие геодинамических процессов находятся в непрерывном изменении. В глобальном масштабе эти перемещения разнородны и происходят с разными скоростями. Это создаёт определённые трудности в поддержании глобальной координатной основы с нужной точностью на современном уровне. Региональные же системы охватывают меньшие территории и их движения более однородны. Следовательно, их координатные основы легче поддерживать на соответствующем жестком уровне. Региональные отсчётные основы постепенно смещаются и разворачиваются по отношению к общей земной основе.

- **Геоцентрическая государственная система координат России ГСК-2011.** Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г введена новая единая государственная система координат ГСК-2011, предназначенная для использования при осуществлении геодезических и картографических работ. Система координат ГСК-2011 закреплена пунктами фундаментальной астрономо-геодезической сети ФАГС. Прежние системы координат СК-42, СК-95 и развитые в пределах субъектов РФ местные системы координат применяются лишь до 1 января 2017 г. Фактически на одних и тех же станциях наблюдений расхождения координат между ГСК-2011 и *ITRF* остаются в пределах 1...3 см; в ГСК-2011 использован новый эллипсоид, размер и форма которого близки к таковым в гравиметрическом эллипсоиде, что имеет значение при вычислении нормальных высот [1, 4, 9, 12, 17, 24].

**Системы счета времени.** Основу составляют: 1. Всемирное время *UT1* (*UT - Universal Time* - всемирное среднее солнечное время Гринвичского меридиана); *UT1* – время *UT*, исправленное за смещения мгновенного полюса относительно принятого его среднего положения; 2) Международное атомное время *TAI* (*Time Atomic International*) и 3) Всемирное координированное время *UTC* (*Universal Coordinated Time*).

- **Всемирное время *UT1*** определяется вращением Земли и соответствует углу ее поворота вокруг оси *CIP*. Фактически оно находится из наблюдений суточных движений далеких радиоисточников методом РСДБ. Практически может быть получено из разности (*UT1-UTC*), регулярно предоставляемой Международной службой вращения Земли и систем отсчета *IERS*.
- **Международное атомное время *TAI*** установлено Международным бюро времени на основе показаний атомных часов в различных учреждениях в соответствии с определением секунды как единицы времени в Международной системе единиц *SI*. При этом использованы отсчёты около 300 атомных часов метрологических лабораторий свыше 50 стран.
- **Всемирное координированное время *UTC*** введено для согласования равномерной шкалы атомного времени с неравномерной шкалой фактически наблюдаемого всемирного времени *UT1*. *UTC* – атомное равномерно текущее время, корректируется на 1 с, когда отклонение от *UT1* превышает 0,9 секунды. Коррекция выполняется в последнюю секунду 30 июня или 31 декабря, или в обе даты. Поэтому шкалы *UTC* и *TAI*

различаются только целым числом секунд. В 1972 г. разность ( $TAI - UTC$ ) составляла  $+10^s$ , в 1982 г. –  $+21^s$ , в 1992 г. –  $+27^s$ , в 2002 г. –  $+32$  с, в 2012 г. –  $+35$  с, а в 2015 г. –  $+36$  с<sup>3</sup>. Продолжительность суток  $UTC$  растёт, скорость вращения Земли убывает.

Повышение точности наблюдений привело к необходимости, в соответствии с общей теорией относительности, создания нескольких шкал времени. Это обусловлено различиями гравитационных потенциалов в центре масс Солнечной системы, в центре масс Земли и на поверхности Земли.

- **Земное время TT (Terrestrial Time)** – соответствует времени, наблюдаемому на врашающемся геоиде. Введено в 1991 г. (взамен применявшегося с 1979 г. земного динамического времени  $TDT$ ). Это время используется в качестве независимого аргумента в расчетах геоцентрических эфемерид спутников. Практически время  $TT$  определяется по атомной шкале  $TAI$ :

$$TT = TAI + 32,184 \text{ с.}$$

- **Геоцентрическое координатное время TCG (Geocentric Coordinate Time)** отнесено к центру масс Земли и предназначено для системы отсчета  $GCRS$ . Оно линейно связано с земным временем  $TT$ .
- **Барицентрическое координатное время TCB (Barycentric Coordinate Time)** предназначено для системы отсчета  $BCRS$  в качестве аргумента в расчётах движений космических аппаратов в удалении от Земли.

Отмеченные шкалы времени тождественны на уровне точности одной миллисекунды. Это очень большая величина. За 1 мс радиоволна проходит путь почти в 300 км, а интервал меньший в миллион раз изменяет расстояние на 0,3 м.

**Системы земных координат, используемые в картографо-геодезических задачах [25]:**

- **географические координаты;**
- **координаты в плоскости геодезической проекции;**
- **координаты в трёхмерном пространстве;**
- **высоты** над земным эллипсоидом и в поле силы тяжести Земли.

**Системы географических координат – широта и долгота.** Эти термины ввёл Гиппарх во II в. до н. э. Широта и долгота – угловые величины, определяющие положение любой точки относительно экватора и начального меридиана. Различают широты и долготы астрономические, отнесенные к реальной планете, а также сферические и эллипсоидальные, применяемые соответственно в шарообразной и сфероидической моделях Земли. По мнению известного геодезиста проф. А.А. Изотова, все эти системы координат “могут быть объединены общим названием системы географических координат”, ибо “эти системы имеют важное значение для географического изучения поверхности Земли” [10, с. 16-17, 27].

**Астрономическая широта** ( $\phi$ ) – угол, образованный отвесной линией в данной точке и плоскостью, перпендикулярной к оси вращения Земли.

**Астрономическая долгота** ( $\lambda$ ) – двугранный угол между плоскостями астрономических меридианов текущей точки и начального меридиана.

**Астрономический меридиан** образуется сечением земной поверхности плоскостью, проходящей через отвесную линию в данной точке параллельно оси вращения Земли.

---

<sup>3</sup> Time Scales. <http://stjarnhimlen.se/comp/time.html> (Дата обращения 3 июля 2015)

|| **Астрономический азимут** (a) — угол в горизонтальной плоскости, в плоскости, перпендикулярной к отвесной линии, отсчитываемый от северного направления астрономического меридиана по часовой стрелке до заданного направления.

Таким образом, астрономические координаты отнесены к *отвесной линии и оси вращения* Земли. Их получают из астрономических наблюдений.

**Сферическая широта и сферическая долгота** используются, когда Земля аппроксимируется шаром. Один диаметр шара совмещается с осью вращения Земли. При этом полагается, что земной шар однороден по строению, и все отвесные линии проходят через его центр. Иначе, *сферические широты и долготы автоматически приравниваются соответственно астрономическим широтам и долготам*. Отождествление сферических координат с астрономическими координатами указывает на практический путь их определения непосредственно из астрономических наблюдений небесных светил.

Для указания направлений используется **географический азимут** — угол в горизонтальной плоскости (плоскости, перпендикулярной к нормали в данной точке шара), отсчитываемый от северного направления географического меридиана по часовой стрелке до заданного направления. Для определения расстояний используется **ортодромия** — кратчайшее расстояние между двумя точками на сфере (отсчитываемое по дуге большой окружности, центр которой находится в центре земного шара).

**Эллипсоидальные координаты.** Более точной моделью земного тела, вращающегося вокруг некоторой оси, является не шар, а сфEROид.

|| **СфEROид** — фигура, которую приняло бы тело, находясь только под влиянием сил взаимного тяготения его частиц и центробежной силы вращения.

Простейшим из сфEROидов является эллипсоид вращения с малым сжатием вдоль полярной оси.

|| **Эллипсоид вращения** — геометрическое тело, которое образуется при вращении эллипса вокруг его малой оси.

Отвесная линия, нормаль к эллипсоиду вращения и его радиус-вектор — это три разные линии в пространстве. Поэтому при работе с земным эллипсоидом понятие географических координат приходится уточнять; в каждой точке земного пространства имеют место координаты:

- астрономические, отнесенные к отвесной линии;
- геодезические, отнесенные к нормали к эллипсоиду;
- геоцентрические, связанные с радиус-вектором эллипсоида.

**Геодезические координаты.** Положение любой точки на эллипсоиде вращения определяется геодезической широтой и геодезической долготой.

|| **Геодезическая широта (B)** — угол, образованный нормалью к поверхности земного эллипсоида в данной точке и плоскостью его экватора.

|| **Геодезический меридиан** определяется плоскостью, проходящей через нормаль к поверхности земного эллипсоида вращения в данной точке и его малую ось.

|| **Геодезическая долгота (L)** — двугранный угол между плоскостями меридиана данной точки и начального меридиана.

Отвесная линия и нормаль к эллипсоиду не совпадают. Поэтому, чтобы перейти от астрономических координат к геодезическим, надо знать угол между нормалью и отвесной линией, называемый *уклонением отвеса в геометрическом толковании*.

Для указания направлений и расстояний используется геодезический азимут и кратчайшая линия на эллипсоиде вращения.

**Геодезический азимут** ( $A$ ) – двугранный угол между плоскостью геодезического меридиана данной точки и плоскостью, проходящей через нормаль в ней и содержащей данное направление, отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке.

**Кратчайшая линия** – линия кратчайшего расстояния между двумя точками на поверхности эллипсоида вращения; она является частью **геодезической линии**. На эллипсоиде вращения геодезическая линия в общем случае описывает бесконечное число витков, последовательно касаясь соответствующих параллелей в северном и южном полусферах и на каждом витке пересекая экватор в разных точках. При этом в каждой точке геодезической линии произведение радиуса параллели ( $r$ ) на синус азимута ( $A$ ) линии есть величина постоянная:

$$r \sin A = \text{const.}$$

Меридианы и экватор являются частными случаями геодезической линии. В навигации используется также линия постоянного азимута – **локсодромия**.

**Геоцентрические координаты.** Их определяют – радиус-вектор, геоцентрические широта и долгота. При этом полагается, что центр эллипса совмещен с центром масс Земли, а его ось вращения – с осью вращения Земли.

**Геоцентрический радиус-вектор** ( $\rho$ ) – отрезок прямой, соединяющий начало координат с определяемой точкой.

**Геоцентрическая широта** ( $\Phi$ ) – угол между радиус-вектором и плоскостью экватора эллипса.

**Геоцентрическая долгота** ( $L$ ) совпадает с геодезической долготой.

**Система координат в плоскости геоэтической проекции.** Плоские геодезические прямоугольные координаты ( $x, y$ ) строятся в равноугольных проекциях, называемых **геодезическими**. В подавляющем большинстве случаев координаты вычисляются в **равноугольных по-перечных цилиндрических** проекциях, обладающих свойствами:

- в каждой точке проекции масштаб длин по любым направлениям одинаков;
- в пределах выделенной зоны искажения малы и их учет прост;
- зоны ограничены меридианами;
- число зон по сравнению с другими равноугольными проекциями минимально;
- все зоны единообразны;
- возможно распространение системы плоских координат на весь земной шар.

Эти проекции применяются в различных версиях. Все версии имеют одинаковые основные характеристики и формулы. Различия версий, применяемых в разных странах, заключаются в выборе начала счета координат, значениях средних меридианов зон, ширине зон и значениях масштаба длин на среднем меридиане. В РФ наибольшее прикладное значение получили две системы плоских равноугольных координат – координаты в проекции *Гаусса-Крюгера* и координаты в проекции *UTM*.

**Геоцентрические прямоугольные координаты в трёхмерном пространстве.** Начало координат расположено в геоцентре. Одну из координатных осей ориентируют по направлению, близкому оси вращения Земли. Эту ось невозможно ориентировать точно вдоль оси вращения Земли, ибо из-за *прецессии* и *нutationи* она перемещается в космическом пространстве относительно звёзд, а из-за *движения полюсов* перемещается и в теле планеты. Система отсчёта координат вводится в соответствии с рекомендациями Международной службы вращения Земли и земных систем отсчёта *IERS*.

В 1967 г. было решено приводить координаты мгновенного полюса к среднему его положению за 1900–1905 гг. Эта точка получила название *Международного условного начала – МУН (CIO - Conventional International Origin)*. Её положение было закреплено координатами пяти станций, на которых выполнялись точные астрономические измерения. Две из этих станций находились в США, по одной в Италии, Узбекистане и Японии. В последующие годы количество станций увеличилось, изменился их состав, а некоторые перестали существовать. Поэтому по рекомендации IERS было введено понятие *Условного земного полюса - CTP (Conventional Terrestrial Pole)* (рис. 5). Позже IERS его переименовала в *IERS опорный полюс – IRP (IERS Reference Pole)*. Был установлен нулевой IERS опорный меридиан – *IRM (IERS Reference Meridian)*. Они соответствуют определениям *Международного бюро времени BIH (Bureau International de l'Heure)* эпохи 1984.



Рис. 5. Мгновенный и условный полюсы Земли

Итак, система отсчёта координат вводится в соответствии с правилами IERS (рис. 6):

- начало прямоугольной системы координат в геоцентре;
- единица длины – *метр* системы *SI*, время – геоцентрическое координатное *TCG*;
- ось *Z* ориентируется на полюс *IRP*, ось *X* лежит на пересечении плоскости экватора с плоскостью нулевого меридиана *IRM*, ось *Y* перпендикулярна к двум первым осям, направлена на восток и образует правую систему координат;
- движения земной коры не влияют на пространственную ориентацию координатных осей.

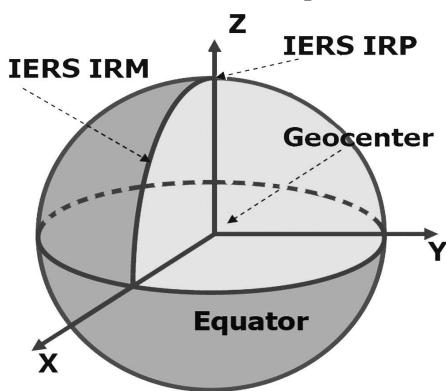


Рис. 6. Система отсчёта координат, устанавливаемая по правилам IERS

В некоторых системах отсчета центры эллипсоидов не совпадают с центром масс Земли. Так, эллипсоид Красовского смещен с центра масс Земли на полторы с лишним сотни метров. В этом случае говорят, что имеют место *квазигеоцентрические координаты*.

**Топоцентрические координаты в трёхмерном пространстве.** Находят применение *топоцентрические координаты – прямоугольные и полярные* (азимут, зенитное расстояние и топоцентрическое расстояние). Начало топоцентрической системы координат помещено в какой-либо точке поверхности Земли, как правило, над эллипсоидом. Одна из координатных осей ориентирована вдоль нормали к эллипсоиду. Две другие оси лежат в плоскости геодезического горизонта, т. е. в плоскости, перпендикулярной нормали к эллипсоиду.

При этом одна из них расположена в плоскости меридiana и направлена в сторону северного полюса. Другая ось – перпендикулярна к первым двум и направлена в сторону увеличения восточной долготы.

Например, топоцентрическая система координат используется в ГНСС измерениях: в начальной точке расположен центр антенны спутникового приёмника, а в конечной точке – центр антенны спутникового передатчика. Азимут *A* и зенитное расстояние *Z* показывают, где находится спутник на небосводе. Вычисление зенитных расстояний спутников и азимутов направлений необходимо для планирования измерений и для того, чтобы иметь представление, где расположен спутник в момент наблюдений.

**Высоты над земным эллипсоидом и высоты в поле силы тяжести Земли.** Для определения точек над эллипсоидом используется *геодезическая высота (H)* – расстояние, отсчитываемое по нормали от поверхности эллипсоида до определяемой точки.

Однако, все материальные объекты подвержены воздействию силы тяжести. Поэтому в повседневной практике пользуются не геодезической высотой, а высотами, связанными с силой тяжести Земли. Системы счёта высот должны учитывать силу тяжести и особенности ее распределения. Для этого должны выполняться условия: 1) высоты пунктов должны быть однозначно определимы независимо от трасс нивелирования; 2) высоты должны вычисляться лишь по измерениям без привлечения гипотез о внутреннем строении Земли; 3) система счета высот должна обеспечивать строгий способ нахождения геодезических высот. В разных странах наибольшее распространение получили две системы:

- *Ортометрическая высота*, определяется над уровнем моря (над геоидом). Если  $H$  – геодезическая высота точки физической поверхности Земли,  $H^g$  – ортометрическая высота,  $\zeta^g$  – высота геоида над эллипсоидом, то

$$H = H^g + \zeta^g.$$

Все эти высоты расположены в теле Земли под физической поверхностью. Поэтому без гипотез о внутреннем строении Земли решить строго это уравнение невозможно.

- *Нормальная высота* определяется в гравитационном поле, создаваемом моделью, так называемой *Нормальной Земли*. Если  $H^\gamma$  – нормальная высота над эллипсоидом, вычисляемая по результатам нивелирования, измерениям силы тяжести и данным гравитационной модели Нормальной Земли,  $\zeta^\gamma$  – аномалия высоты, определяемая разностью нормального и реального потенциалов силы тяжести, то для высот можно записать:

$$H = H^\gamma + \zeta^\gamma.$$

Эти высоты находят математически строго лишь по измерениям на поверхности Земли и без привлечения гипотез о её внутреннем строении [15, 16].

**Спутниковое нивелирование.** Нормальные высоты, как известно, получают геометрическим нивелированием. Но их можно определять и по данным высокоточного позиционирования – *спутниковым нивелированием*. При помощи ГНСС для точек земной поверхности определяют геодезические высоты  $H$ . При известной аномалии высоты нормальную высоту получают из уравнения:

$$H^\gamma = H - \zeta^\gamma.$$

Существуют разные способы определения аномалии высоты. Популярен способ интерполяции её на определяемый пункт с окружающих пунктов, на которых она уже известна. Точность спутникового нивелирования соответствует точности нивелировок IV-III классов.

**Международные работы по совершенствованию систем отсчёта и отсчётных основ.** В 2003 г. на XXIII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики принято решение о создании Глобальной геодезической системы наблюдений *GGOS (Global Geodetic Observation System)*. Цель этого проекта повышение точности и стабильности единой отсчетной основы Земли, а также изучение ее гравитационного и магнитного полей, атмосферы, деформаций поверхности суши, изменений уровня Мирового океана и др. В состав космического сегмента системы войдет свыше 100 спутников ГНСС. Наземный сегмент будет включать не менее 40 станций с приемной спутниковой аппаратурой, лазерными дальномерами, приборами для измерения силы тяжести, другими геодезическими приборами. Завершение создания системы планируется к 2020 г.

Актуальной является проблема приведения высот к единой отсчетной поверхности. На Земле действует несколько вертикальных систем отсчета, отнесенных к уровням местных морей. Хотя нули всех исходных пунктов в целом близки к среднему уровню океанов, все же это разные и взаимно несвязанные системы. Проблема приведения высот к единой отсчетной поверхности практически еще не решена. В последние годы мировая научная обществен-

ность прилагает определенные усилия в направлении теоретического и практического решения этой проблемы.

Ведутся исследовательские работы по созданию Глобальной вертикальной отсчётной основы – **GVRF** (*Global Vertical Reference Frame*). Разработана методика реализации такой системы на основе региональных вертикальных отсчетных основ Северной Америки, Австралии, Франции и Бразилии [27].

Для решения проблемы введения единой отсчетной поверхности нужен единый общеземной эллипсоид с известным на его поверхности значением нормальной силы тяжести [8]. В рассматриваемом случае не будет фиксированного, закрепленного исходного пункта типа Кронштадтского футштока, в котором нормальная высота равна нулю. Систему счёта высот закрепит совокупность геодезических пунктов, в которых известны геодезическая высота  $H$ , нормальная высота  $H'$  и аномалия высоты  $\zeta'$ .

### **Источники информации Лекции 1**

1. Андреев В.К. Роль и место в исследованиях по геодезическому обеспечению системы ГЛОНАСС в рамках НИР «Развитие» государственных единых систем координат ГСК-2011 и ПЗ-90, высокоточного определения координат и гравитационного поля Земли. [Электронный ресурс] URL: [http://www.glonass-center.ru/aboutIAC/Report%20by%20Andreev\\_4.pdf](http://www.glonass-center.ru/aboutIAC/Report%20by%20Andreev_4.pdf) (дата обращения 3.02.2014).
2. Бойков В. В., Галазин В. Ф, Каплан Б. Л и др. Опыт создания геоцентрической системы координат ПЗ–90 // Геодезия и картография. 1993. № 11. С.17–21.
3. Валеев С. Г., Клюиков А.А., Кузин С.П., Татевян С.К., Фасхутдинова В.А. Исследования динамики геоцентра по результатам анализа измерений спутниковых систем DORIS и GPS // Геодезия и картография. 2011, № 12. С. 1–10.
4. Вдовин В.С. Доклад на заседании секции №3 НТС ФГУП ЦНИИмаш по вопросу «Общий замысел геодезических направлений исследований в рамках НИР «Развитие»» от 28 мая 2013 года. ФГУП «ЦНИИмаш», г. Королев. [Электронный ресурс] (дата посещения 22.07.2014). URL: [http://www.glonass-center.ru/aboutIAC/Report%20by%20Vdovin\\_2.pdf](http://www.glonass-center.ru/aboutIAC/Report%20by%20Vdovin_2.pdf)
5. Герасимов А.П. Спутниковые геодезические сети. М.: 000 “Изд-во Проспект.” 2012. - 176 с.
6. Горобец В. П., Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат. // Геопрофи. 2013. № 6. С. 4–9.
7. Горобец В. П., Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Результаты построения государственной геоцентрической системы координат Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» // Геодезия и картография. 2012. N 2. С. 53–57.
8. Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Юркина М. И. Построение общеземной системы нормальных высот // Геодезия и картография. 2009. № 1. с. 12-16.
9. Единая государственная общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11): история создания, перспективы использования. [Электронный ресурс] URL: [http://www.atminst.ru/up\\_files/seminar\\_28-05-2013\\_doklad1.pdf](http://www.atminst.ru/up_files/seminar_28-05-2013_doklad1.pdf) (дата обращения 3.02.2014).
10. Изотов А.А., Зубинский В.И., Макаренко Н.Л., Мишиша А.М. Основы спутниковой геодезии. - М.: Недра. 1974. - 320 с.
11. Картография. Термины и определения. ГОСТ 21667–76. Издание официальное. Москва. Государственный комитет СССР по стандартам. - 44 с.
12. Кафтан В. И. Европейские исследователи оценивают возможности геодезического использования ГЛОНАСС // Геодезия и картография. 2007. № 4. С. 21–23
13. Матвеев А. Ю., Федоров Д. В., Гребнев В. П., Лукин В. В., Fritzsche M., RichterA., Dietrich R. Высокоточные временные ряды координат, полученные из GNSS-наблюдений в Антарктиде: 1. Геодезические определения // Геодезия и картография. 2012. N 11. С. 17–23.
14. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52572 2006. Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2006. - 11 с.
15. Огородова Л.В. Теория Молоденского и геоид // Геодезия и картография. 2013. N 8. С. 2–7.
16. Огородова Л.В. Высшая геодезия. Часть 3. Теоретическая геодезия: Учебник для вузов. - М.: Геодезкартиздат. 2006. 384 с.

17. Основные положения о государственной геодезической сети РФ. [Электронный ресурс]. URL: <http://astrgeo.wl.dvgu.ru/Arx/OGGS.doc> (дата обращения 31.01.2014).
18. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90). М.: Координационный научно-информационный центр. – 36 с.
19. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2012 г. № 1463. О ЕДИНЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ. [Электронный ресурс]. URL: [http://meteo.ru/пра/2012/2012\\_1\\_23.pdf](http://meteo.ru/пра/2012/2012_1_23.pdf) (дата обращения 19.08.2014).
20. Правительство Российской Федерации. Постановление от 28 декабря 2012г. № 1463. О единых государственных системах координат. URL: <http://gis-lab.info/docs/law/statecoord-2012.doc> (дата обращения 3.02.2014).
21. Руководство по Всемирной геодезической системе - 1984 (WGS-84). Международная организация Гражданской авиации. Издание 2. 2002. URL: [http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/ICAO\\_Doc9674.pdf](http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/ICAO_Doc9674.pdf) (дата обращения 3.02.2014).
22. Селешников С. И. История календаря и хронология. - М.: Наука. 1972. 224 с.
23. Серапинас Б. Б. Земная система отсчета и её составные части // Геопрофи. 2009. №1. С. 49–53.
24. Серапинас Б. Б. Практикум по геодезическим основам карт. Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ. 2008. - 146 с.
25. Серапинас Б. Б. Геодезические основы карт: Учебное пособие. М.: Изд-во Моск. Ун-та. 2001. 133 с.
26. Татевян С.К. Проблемы построения земной координатной основы // Геодезия и картография. 2009. № 4. С. 9–13.
27. Burša M. et al. A Global Vertical Reference Frame Based on Four Regional Vertical Datums. // Studia Geophysica et Geodaetica. July 2004, Volume 48, Issue 3, pp 493-502. URL: <http://www.springerlink.com/content/t23g447131178up1/> (дата обращения 3.02.2014).
28. Capitaine Nicole. Implementing the IAU 2006 resolutions in the transformation between celestial and terrestrial systems. Observatoire de Paris, SYRTE/UMR8630–CNRS, France. IERS Workshop on Conventions, BIPM, September 2007. URL: <http://www.bipm.org/utils/en/events/iers/Capitaine.pdf> (дата обращения 08.07.2015).
29. IAU Resolutions adopted the 24th General Assembly (Manchester, August 2000). URL:[http://syrte.obspm.fr/IAU\\_resolutions/Resol-UAI.htm](http://syrte.obspm.fr/IAU_resolutions/Resol-UAI.htm) (дата обращения 14.01.2014).
30. IAU 2006 NFA GLOSSARY, latest revision: 20 November 2007. URL: [http://syrte.obspm.fr/iau/iauWGnfaTemp/IAU2000\\_NFA\\_Glossary.pdf](http://syrte.obspm.fr/iau/iauWGnfaTemp/IAU2000_NFA_Glossary.pdf) (дата обращения 14.01.2014).
31. International Earth Rotation and Reference Systems Service. URL: <http://www.iers.org/> (дата обращения 25.07.2014).
32. ITRF 2008. URL: [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2008/](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/) (дата обращения 26.07.2014).
33. Moritz. H. GEODETIC REFERENCE SYSTEM 1980 [Электронный ресурс] URL: <http://geodeticscience.org/course/refpapers/00740128.pdf> (дата обращения 3.02.2014).
34. The International GNSS Service (IGS). URL: <http://igscb.jpl.nasa.gov/> (дата обращения 31.01.2014).
35. The International GNSS Service (IGS). Network list. URL: <http://igscb.jpl.nasa.gov/network/list.html> (дата обращения 31.01.2014).
36. The International GNSS Service (IGS). Net index. URL: <http://igscb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html> (дата обращения 31.01.2014).
37. The International GNSS Service (IGS). IGS Products. URL: <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html> (дата обращения 31.01.2014).
38. Yuanxi Yang. Chinese Geodetic Coordinate Reference Frame 2000. URL: <http://www.oosa.unvienna.org/pdf/icg/2009/icg-4/40d.pdf> (дата обращения 31.01.2014).

### **Контрольные вопросы**

1. Что означают понятия *система отсчёта* и *отсчетная основа*?
2. Какие системы отсчёта обозначают аббревиатуры *BCRS*, *ICRS*, *GCRS*, *GTRS*, *ITRS* и как они взаимно связаны?
3. Какую роль в установлении систем отсчёта выполняют внегалактические радиоисточники?
4. Назначение и содержание *WGS-84*.

5. Что означают обозначения  $G\text{-}730$ ,  $G\text{-}873$ ,  $G\text{-}1150$  и к какой отсчётной основе они относятся?
6. Почему создаются и используются на базе международных общеземных систем отсчёта региональные системы  $ETRS$ ,  $NAD\text{-}83$ ,  $NAVD\text{-}88$ ,  $GDA\text{-}94$ ?
7. Какие знаете версии системы параметров Земли ПЗ-90?
8. Назначение и задачи Международной службы  $IGS$ .
9. Характеристика ГСК-2011.
10.  $UT1$ ,  $TAI$ ,  $UTC$  – особенности этих систем счёта времени.
11. Особенности шкал счёта времени  $TT$ ,  $TCG$  и  $TCB$ .
12. Какие системы координат могут быть объединены общим названием *географические координаты*?
13. Какими свойствами должны обладать геодезические проекции, применяемые для введения плоских координат?
14. В чём различие геоцентрических и топоцентрических координат?
15. Что такое *прецессия и нутация*? Чем они обусловлены?
16. Что понимается под *движением полюсов Земли*?
17. Какие рекомендации  $IERS$  по установлению систем отсчёта координат?
18. Поясните смысл системы  $GGOS$ .
19. Какие особенности геодезических высот и почему их не применяют в повседневной жизни?
20. В чём принципиальное различие нормальных и ортометрических высот?
21. Какие предполагаются работы по созданию  $GVRF$ ?

### Темы рефератов и презентаций

1. Международная общеземная система отсчёта  $ITRS$  и её отсчётная основа  $ITRF$ .
2. Общеземные системы отсчёта для обеспечения работ  $GPS$ , ГЛОНАСС, *Галилео* и *Compass*.
3. Международная ГНСС служба -  $IGS$ .
4. Представления о движениях материков на основе анализа карт векторов перемещений пунктов  $IGS$  и  $ITRF$ .
5. Системы отсчета регионального уровня: Европейская -  $ETRS$ , Североамериканская -  $NAD\text{-}83$ , Австралийская —  $GDA\text{-}94$ .
6. Системы координат России: СК-42, СК-63, СК-95, местные системы и новая единая государственная система координат ГСК-2011.
7. Проект и программа Глобальной геодезической системы наблюдений  $GGOS$ .
8. Трансформирование координат РФ из СК-42, СК-63, СК-95, местных систем в новую единую государственную систему координат ГСК-2011 (обзор методов).
9. Проблема развития единой Глобальной вертикальной отсчётной основы –  $GVRF$ .
10. Спутниковое нивелирование, способы определения аномалий высот.
11. Геодезические параметры  $GRS\text{-}1980$ ,  $WGS\text{-}84$ , ПЗ-90.11, ГСК-2011 и их сравнительный анализ.
12. Плановые и высотные государственные геодезические сети СССР и РФ. История создания и перспективы развития.
13. Гравиметрические сети, абсолютные и относительные способы измерений силы тяжести.
14. Методы триангуляции и трилатерации построения опорных геодезических сетей.
15. Метод спутниковой триангуляции.
16. Доплеровские методы в построении геодезических сетей.
17. Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой – РСДБ, его значение для построения общеземных опорных сетей.

18. Использование геодезических комплексов ГЕОИК.
19. Использование ГНСС при построении геодезических опорных сетей.
20. Закрепление пунктов ГГС на местности.
21. Погрешности геодезических измерений и характеристики их точности.

#### **Перечень лекций**

- I. Введение. Системы отсчёта координат и времени.
- II. Определения координат и времени методами геодезической астрономии.
- III. Земные сфера и сфериоид.
- IV. Вычисления координат на сфере и на сфероиде.
- V. Теоретические основы плоских координат.
- VI. Пространственные координаты.
- VII. Гравитационное поле. Связь координат. Высоты.
- VIII. Опорные геодезические сети.
- IX. Уравнивание геодезических сетей.