

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ НАУК О ЗЕМЛЕ

И. Р. ИДРИСОВ
А. Ф. НИКОЛАЕВ
С. С. НИКОЛАЕВА

МИРОВЫЕ И ГОСУДАРСТВЕННЫЕ
СИСТЕМЫ КООРДИНАТ
И СЧЕТА ВРЕМЕНИ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ГЕОГРАФИИ,
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ

Учебно-справочное пособие



Тюмень
Издательство
Тюменского государственного университета
2016

УДК 528 (075.8)
ББК Д112я73
И298

Авторы:

Идрисов Ильдар Рустамович — кандидат географических наук, и. о. заведующего кафедрой картографии и геоинформационных систем Института наук о Земле Тюменского государственного университета

Николаев Альберт Феохтистович — кандидат технических наук

Николаева Светлана Сергеевна — ассистент кафедры картографии и геоинформационных систем Института наук о Земле Тюменского государственного университета

Рецензенты:

Пшеничников А. Е. — доцент кафедры картографии и геоинформатики Института наук о Земле Тюменского государственного университета

Одинец И. В. — начальник отдела геодезии и картографии Управления федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Тюменской области

Идрисов, И. Р.

И298 Мировые и государственные системы координат и счета времени, используемые в географии, геодезии и картографии [Электронный ресурс] : учебно-справочное пособие / И. Р. Идрисов, А. Ф. Николаев, С. С. Николаева ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Тюменский государственный университет, Институт наук о Земле. — Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2016. — 112 с.

ISBN 978-5-400-01331-7

Учебное пособие содержит сведения о формах (моделях) Земли: шаре, геоиде, общеземных и референчных эллипсоидах, квазигеоиде. Описаны системы мировых геоцентрических пространственных координат ПЗ-90, WGS и Международная система ITRS. Рассмотрен вопрос использования государственной системы координат РФ СК-95. Указаны параметры общеземных эллипсоидов, применяемых с 1 января 2014 г. в единых государственных системах координат: общеземной геоцентрической системе — ПЗ-90.11; геодезической системе — ГСК-2011. Рассмотрен вопрос использования государственной системы координат СК-95 в географическом, геодезическом и картографическом мониторинге Земли для нужд хозяйственной деятельности РФ. Приведены основные положения и краткие сведения об ортометрической, нормальной, геодезической, динамической и условной системах высот. Описаны системы звездных координат и счета времени, используемые при вычислении эфемерид искусственных спутников Земли спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, DORIS. Пособие включает подробный глоссарий.

Предназначено для бакалавров направлений Гидрометеорология (05.03.04), Картография и геоинформатика (05.03.03), Экология и природопользование (05.03.06), Ландшафтная архитектура (35.03.10).

УДК 528 (075.8)

ББК Д112я73

ISBN 978-5-400-01331-7

© Тюменский государственный университет, 2016

© Идрисов И. Р., Николаев А. Ф., Николаева С. С., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	9
§ 1. Земной шар, геоид.....	9
§ 2. Общеземные и референц-эллипсоиды.....	10
§ 3. Вспомогательная модель Земли — квазигеоид (почти геоид).....	13
ГЛАВА 2. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ВВЕДЕННЫЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МОДЕЛЕЙ ЗЕМЛИ И ГЕОГРАФИЧЕСКОГО, ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО И КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ.....	14
§ 1. Общеземные системы геоцентрических прямоугольных координат ПЗ-90, ПЗ-90.11 и WGS-84.....	14
§ 2. Единая Международная система пространственных геоцентрических координат — ITRS	18
§ 3. Референчные подсистемы координат в СК-95, отнесенные к эллипсоиду Красовского	19
3.1. Общие положения	19
3.2. Референчная подсистема геоцентрических координат в СК-95.....	23
3.3. Референчная подсистема геодезических (эллипсоидальных) координат В, L, Н _Г в СК-95	24
3.4. Зональные плоские прямоугольные координаты X и Y в проекции Гаусса-Крюгера	31
3.5. Определение геодезических и зональных координат по топографической карте	35
3.6. Вычисление зональных (плоских прямоугольных) координат X и Y по геодезическим (эллипсоидальным) В и L	38
3.7. Местные плоские прямоугольные координаты x и y.....	40

ГЛАВА 3. СИСТЕМЫ ВЫСОТ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГЕОГРАФИЧЕСКОМ, ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ И КАРТОГРАФИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ЗЕМЛИ	44
§ 1. Общие положения.....	44
§ 2. Ортометрическая система высот.....	44
§ 3. Система нормальных высот.....	45
§ 4. Система геодезических высот.....	47
§ 5. Динамические высоты.....	48
§ 6. Условные высоты.....	49
ГЛАВА 4. ЗВЕЗДНЫЕ (НЕБЕСНЫЕ) СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ЭФЕМЕРИД СПУТНИКОВ	50
§ 1. Истинная (инерциальная) система небесных координат.....	50
§ 2. Круги и плоскости небесной сферы.....	55
§ 3. Экваториальные системы небесных координат.....	60
§ 4. Горизонтальные системы небесных координат.....	63
§ 5. Орбитальные системы координат.....	64
§ 6. Международная небесная опорная система координат — ICRS, ее реализация — ICRF.....	70
§ 7. Эклиптическая система небесных координат.....	71
§ 8. Галактическая система небесных координат.....	73
§ 9. Связи между небесными системами координат.....	75
ГЛАВА 5. СИСТЕМЫ СЧЕТА ВРЕМЕНИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ОБРАБОТКЕ ТРАДИЦИОННЫХ И СПУТНИКОВЫХ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ	81
§ 1. Общие положения.....	81
§ 2. Звездные системы счета времени.....	89
§ 3. Солнечные системы счета времени.....	91
§ 4. Атомное время.....	93
ГЛОССАРИЙ	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	108

ВВЕДЕНИЕ

Использование спутниковых систем для построения астрономо-геодезических сетей, решения навигационных, динамических, геотектонических и инженерно-геодезических задач, к которым относятся и геодезическое обеспечение географического, геодезического и картографического мониторинга Земли, определило пересмотр существующих координатных систем [1, 10, 24, 27, 51, 55]. Возникла необходимость более широкого внедрения в геодезическую практику пространственных геоцентрических прямоугольных координат наряду с использованием пространственных эллипсоидальных (криволинейных) координат.

В настоящее время в геодезических целях используются, в основном, три глобальные (планетарные) спутниковые системы: GPS (Global Positional System — Глобальная система позиционирования), созданная специалистами США; ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система), разработанная в России; DORIS (Doppler Orbitography Radiopositioning Intergrated on Sattelite — Допплеровская орбитальная радиотехническая интегрированная на спутниках система), созданная геодезической службой Франции [1, 4, 12, 13-15, 33, 41, 46].

При решении общеземных задач (запуск и наблюдение искусственных спутников Земли (ИСЗ), в дальнейшем спутников; навигация межпланетных аппаратов; геодинамический мониторинг литосферных плит земной оболочки и др.) используются следующие мировые и международные системы геоцентрических прямоугольных и соответствующих им эллипсоидальных пространственных координат: ПЗ-90, WGS-84, GRS 80, ITRS [1, 7, 10, 33, 56-59].

Первая мировая система координат ПЗ-90 (параметры Земли, определенные в 1990 г.) разработана и внедрена российскими геодезистами, главным образом военными. Она обслуживает спутники системы ГЛОНАСС [1, 12, 14, 41].

Вторая система мировых координат WGS-84 (World Geodetic System — мировая геодезическая система, разработанная в 1984 г.

специалистами США) обслуживает спутниковую систему GPS [55-60].

Третья мировая система координат GRS 80 (Global Reference System — мировая отсчетная система, разработанная геодезистами Канады и США с участием ученых европейских стран в 1980 г.) предназначена обеспечивать навигацию (движение) спутников системы DORIS [1, 7, 47, 52].

Международная система координат ITRS (International Terrestrial Reference System — международная общеземная отсчетная система, разработанная усилиями геодезистов Америки и Евразии в 1991 г.) призвана объединить вышеназванные мировые системы координат [51, 59]. Параметры системы координат ITRS (положение начала координат в мировом пространстве и ориентировка координатных осей) постоянно уточняются.

В РФ с 28 декабря 2012 г. введена общеземная (мировая) геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) для решения навигационных задач [34].

Названные мировые системы координат отнесены к отсчетным эллипсоидам, имеющим аббревиатуру соответствующей координатной системы. Так как любой эллипсоид привязан к оси вращения Земли, которая из-за неравномерного распределения масс внутри Земли, явлений прецессии и нутации и других причин меняет свое положение в космическом пространстве, возникла необходимость введения условно постоянной точки. За такую точку приняли Северный земной полюс, получивший аббревиатуру УЗП — условный земной полюс. Положение УЗП на начало 1905 г. в космическом пространстве узаконено на XIV Генеральной ассамблее Международной ассоциации геодезии (МАГ), состоявшейся в 1967 г. [12]. УЗП по времени привязан к Международному условному началу (МУН). МУН отнесено к началу 1905 г. [62].

Для практических целей (например, для вычисления эфемерид спутников спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и DORIS) необходимо знать положение мгновенного земного полюса (на реальный момент времени) относительно принятого МУН.

Положение мгновенного земного полюса относительно МУН определяют по результатам радиоинтерферометрических наблюдений межгалактических объектов, в т. ч. квазаров. Наблюдения этих объектов ведут при помощи мощных радиотелескопов с сверхдлинных баз [1, 13, 31, 46].

Если мировые системы координат ПЗ-90, ПЗ-90.11, WGS-84 и GRS 80 привязаны к изменяющей свое положение оси вращения Земли, то Международная система координат ITRS, отнесенная к общеземному эллипсоиду, параметры которого уточняются через несколько лет, практически является инерциальной системой [51, 54].

Определением параметров ITRS занимается Международная служба Земли — IERS (International Earth Rotation Service), которая тесно сотрудничает с Международным бюро времени — ВИН (Bureau International de l'Heure). ВИН, в свою очередь, строит шкалу Международного атомного времени TAI (Time Atome International).

TAI используется в опорных генераторах спутниковых и наземных следящих станций.

Система координат ITRS реализуется международной опорной сетью (каркасом) ITRF (International Reference Terrestrial Frame), включающей в себя более 200 станций. ITRS связана с Международной небесной опорной координатной системой ICRS (International Celestial Reference System).

Кроме мировых систем координат и объединяющей их Международной системы ITRS, в практике применяют референцные координатные системы, привязанные к референц-эллипсоидам. Основными референцными системами координат являются: СК-95 (Россия); NAD 83 (США и Канада); ETRS (Западная Европа) [48, 60].

Переход от системы высот 1942 г. к системе 1977 г., развитие достаточно густой гравиметрической мировой сети позволили более точно определять высоты квазигеоида над принятым эллипсоидом [10, 18, 21, 30].

Спутниковые наблюдения и обработка их результатов тесно связаны с системами счета времени и требуют учета несинхрони-

зации часов на спутниках и спутниковых приемниках. Знание систем счета времени (звездного, солнечного и атомного) вызывает необходимость изучения небесных координатных систем.

Работа содержит пять глав. В первой главе описаны формы современного представления фигуры Земли: шар, геоид, эллипсоид, квазигеоид.

Во второй — рассмотрены общеземные (мировые) системы координат: ПЗ-90, ПЗ-90.11, WGS-84 и Единая Международная система геоцентрических пространственных координат ITRS. Приведена структура референчных подсистем системы государственных координат СК-95, отнесенных к эллипсоиду Красовского с параметрами: большая полуось (экваториальная) $a = 6378245$ м; полярное сжатие $\alpha = 1:298,3$. Дана выписка из Постановления Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 об определении срока действия СК-95 до 1 января 2017 г. Описаны местные системы плоских прямоугольных координат и методика перевода их в СК-95.

Приведены параметры общеземного эллипсоида ГСК-2011.

В третьей главе дано описание ортометрической, нормальной (Балтийской 1977 г.), геодезической, динамической и условной системы высот.

В четвертой главе приведены сведения о звездных (небесных) системах координат, включая спутниковую орбитальную систему.

Пятая глава посвящена системам счета времени, используемых в геодезических измерениях.

Приведен глоссарий, содержащий термины, используемые в картографо-геодезическом мониторинге Земли.

ГЛАВА 1. ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 1. ЗЕМНОЙ ШАР, ГЕОИД

Физическая Земля, на которой выполняют геодезические измерения горизонтальных и вертикальных углов, расстояний на поверхности Земли и дальностей до космических объектов, интервалов времени, превышений между точками, является сложной фигурой. Для практических целей используют различные формы (модели) представления фигуры Земли.

Первой и наиболее простой моделью Земли является **шар радиуса $R = 6371,11$ км**, ориентированный по северному полюсу оси вращения Земли и перпендикулярной ей плоскости земного экватора [5-9, 28]. Величину R используют при вычислении поправок в результаты геодезических измерений при редуцировании измеренных линий на местности на поверхность отсчетного эллипсоида, а затем — на плоскость. При решении инженерно-геодезических задач на территориях (участках земной поверхности) площадью до 20 км^2 допускается принимать Землю за шар вышеуказанного радиуса [22].

Второй моделью Земли принято считать **геоид** — эквипотенциальную поверхность, совпадающую со средним уровнем мирового океана и виртуально (мысленно) продолженную под континенты (сухопутную часть поверхности Земли). Так как, по определению, эквипотенциальных (уровенных) поверхностей можно провести бесчисленное множество, при обработке геодезических измерений используют геоид, поверхность которого совпадает с нулевым штрихом футштока (измерительной рейки), установленного на устье одного из мостов г. Кронштадта. Относительно нити отвеса, совпадающей с направлением силы тяжести, и перпендикулярной ему горизонтальной плоскости, касательной в точке наблюдения и геоиду, выполняют все астрономические и геодезические наблюдения [25, 28, 31].

Производство картографической продукции требует введения в зависимости от ее назначения определенной системы координат. Поэтому возникает необходимость представления физической Земли в виде фигуры (модели), имеющей математическое описание.

Как показано выше, модель Земли в виде шара позволяет решать инженерно-геодезические задачи на территориях площадью только до 20 км^2 ; иначе понижается требуемая точность работ. Геоид описать математически практически невозможно из-за неравномерного распределения масс внутри Земли [18, 21, 30, 31].

По результатам астрономо-геодезических наблюдений установлено, что Земля близка к сфероиду, сплюснутому у полюсов. Наиболее приемлемой моделью сфероида для представления физической поверхности Земли является эллипсоид — вращающийся вокруг малой оси эллипс [3, 7, 35, 41].

§ 2. ОБЩЕЗЕМНЫЕ И РЕФЕРЕНЦ-ЭЛЛИпсоИДЫ

Третьей моделью Земли является **земной эллипсоид**, образованный вращением земного эллипса вокруг малой (полярной) оси. В геодезической практике используют две разновидности эллипсоидальной модели Земли: общий земной эллипсоид и частный земной эллипсоид [41]. Частный земной эллипсоид принято называть **референц-эллипсоидом**. Модель Земли в виде общего земного эллипсоида используют для картографирования и решения инженерных задач на территории всей планеты. Модель же Земли, представленная в виде референц-эллипсоида, позволяет решать картографические и инженерно-геодезические проблемы и хозяйственные задачи с необходимой точностью на территории одного или нескольких государств.

Общий земной эллипсоид часто называют абсолютным земным эллипсоидом, а референц-эллипсоид — относительным.

Главными характеристиками (параметрами) земных эллипсоидов, отнесенных к определенному времени (году) являются: большая (экваториальная) полуось a и полярное сжатие α (рис. 1). Малая полуось b совпадает с осью вращения Земли или параллельна ей.

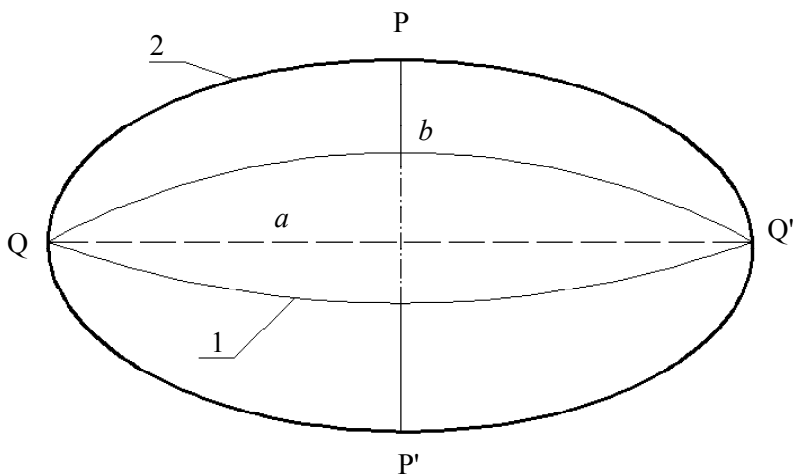


Рис. 1. Земной эллипсоид: 1 — земной экватор; 2 — земной эллипсоидальный меридиан; PP' — малая ось образующего эллипса; QQ' — большая ось образующего эллипса

Параметры земных эллипсоидов определяют на основании многократных астрономо-геодезических, гравиметрических и космических наблюдений земных пунктов и космических объектов (звезд, искусственных спутников Земли, квазаров) [41].

Так, параметры общего земного эллипсоида, отнесенные к 1990 г. и используемые в глобальной навигационной спутниковой системе ГЛОНАСС (Россия), имеют следующие значения: $a = 6378136$ м; $\alpha = 1:298,257839$ [11, 13, 41, 46]. Параметры общего земного эллипсоида, отнесенные к 1984 г. и используемые в глобальной спутниковой системе позиционирования GPS (США), имеют такие значения: $a = 6378137$ м; $\alpha = 1:298,257223$ [3, 52].

Параметры общего земного эллипсоида, отнесенные к 2011 г. и используемые в общеземной геоцентрической системе координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11), равны: $a = 6378245$ м; $\alpha = 1:298,25784$ [34].

В технической и нормативной литературе [1, 3, 7, 11, 34, 41] наименования вышеуказанных параметров общих земных эллипсоидов и связанных с ними систем пространственных геоцентрических прямоугольных координат, используемых при обработке результатов наблюдений ИСЗ, принято сокращенно обозначать: ПЗ-90 (определены к 1990 г. в России); WGS-84 (определены к 1984 г. в США); ПЗ-90.11 (определены в 2011 г. в РФ).

Параметры ПЗ-90.11 получены с использованием следующих фундаментальных постоянных: скорость света в вакууме — $c = 299792458$ м/с; геоцентрическая гравитационная постоянная — $f_M = 39860044,18 \cdot 10^7$ м³/с²; угловая скорость вращения Земли — $\omega = 7292115 \cdot 10^{-11}$ рад/с; нормальный потенциал Земли — $UO = 62636861,074$ м²/с² [12, 31-34, 41].

Параметры референц-эллипсоида, отнесенные к 1942 г. (эллипсоид Красовского) в России, имеют следующие значения: $a = 6378245$ м; $\alpha = 1:298,3$ [41]. Значения a и α использованы при введении государственной системы координат 1995 г. — СК-95 Постановление Правительства РФ от 28.07.2000 г. № 568 [Электронный ресурс]. Доступ из СПС «Консультант Плюс».

За рубежом введены такие референц-эллипсоиды (относительные эллипсоиды): эллипсоид Кларка на территории Северной Америки; эллипсоиды Хейфорда и Бесселя на территории Европы; эллипсоид Эвереста на территории Индии и др. [12, 33, 45, 58, 59].

Задание третьей координаты — высоты (аппликаты Z) ограничивалось обособленным определением высот из геометрического и тригонометрического нивелирования относительно среднего уровня Балтийского моря. В принятой в 1946 г. Балтийской системе высот 1942 г. за начало счета высот был принят нулевой штрих футштока (измерительной рейки), прикрепленного к устою одного из мостов г. Кронштадта. То есть в Балтийской системе высот 1942 г. высоты точек земной поверхности определялись относительно поверхности геоида — уровенной поверхности, проведенный через нуль Кронштадтского футштока. С 1977 г. высоты точек физической поверхности Земли стали отсчитывать от двух математически

определенных фигур (моделей) Земли: от поверхности референц-эллипсоида Красовского в СК-95 и общего земного (мирового) эллипсоида ПЗ-90 в системе ПЗ-90 (пространственных прямоугольных геоцентрических координат); от поверхности квазигеоида, введенного советским геодезистом М. С. Молоденским. В первом случае высоты получили название геодезических, а во втором — нормальных (отсчитанных по нормали к поверхности отсчетного эллипсоида относительно вспомогательной поверхности квазигеоида).

§ 3. ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМЛИ — КВАЗИГЕОИД (ПОЧТИ ГЕОИД)

Квазигеоидом (почти геоидом) принято называть поверхность, отстоящую от поверхности отсчетного эллипсоида на величину высот квазигеоида. Последние вычисляют по результатам гравиметрических и астрономо-геодезических наблюдений при условии нормального распределения масс внутри Земли [30]. Точки физической поверхности Земли отстоят от вспомогательной поверхности квазигеоида на величину нормальных высот.

В равнинной местности поверхности геоида и квазигеоида совпадают, а в горных районах расхождения между ними не превышают нескольких метров [18, 19, 41].

Напомним, что точки физической поверхности Земли отстоят от поверхности отсчетного эллипсоида (общеземного в системе координат ПЗ-90 и референц-эллипсоида в СК-95) на величину геодезических высот. То есть геодезическая высота точки поверхности Земли равна сумме величины нормальной высоты точки, определенной относительно квазигеоида и высоты квазигеоида, определенной относительно отсчетного общеземного или референц-эллипсоида в этой точке [30, 41].

ГЛАВА 2. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ВВЕДЕННЫЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МОДЕЛЕЙ ЗЕМЛИ И ГЕОГРАФИЧЕСКОГО, ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО И КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ

§ 1. ОБЩЕЗЕМНЫЕ СИСТЕМЫ ГЕОЦЕНТРИЧЕСКИХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КООРДИНАТ ПЗ-90, ПЗ-90.11 и WGS-84

Рассмотрим системы координат, отнесенные к общему земному эллипсоиду (абсолютному).

К абсолютному эллипсоиду относят две системы пространственных прямоугольных координат: ПЗ-90 (параметры Земли), отнесенная к эллипсоиду с большой полуосью $a = 6378136$ м и полярным сжатием $\alpha = 1:298,257839$, полученным по результатам астрономо-геодезических, гравиметрических и спутниковых наблюдений, выполненных на суше, в море и космосе специалистами России за период с 1981 по 1990 г.; WGS-84 (мировая геодезическая система), отнесенная к эллипсоиду с большой полуосью $a = 6378137$ и полярным сжатием $\alpha = 1:298,257234$, вычисленным по результатам соответствующих работ, проведенных в США за период с 1975 по 1983 г. [1, 3, 11, 33, 41].

Мировая система координат ПЗ-90 реализована по результатам наблюдений геодезических спутников ГЕО-ИК (Россия) в 1977-1990 гг. с 33-х наземных пунктов космической геодезической сети (26 из них расположены на территории России и СНГ и 7 — в Антарктиде), 131 пункта Допплеровской геодезической сети и гравиметрических съемок тех лет [1, 12, 41].

С 28 декабря 2012 г. введена общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) [34].

В России до 1 января 2017 г. действующими являются три системы координат ГСК-2011, СК-95 и СК-42. Первая утверждена Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат». Последние от-

меняются 01.01.2017 этим же постановлением [37]. Для перехода в ГСК-2011 был подготовлен Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии «Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года», в котором были утверждены значения трансформирования для основных систем координат, используемых в РФ.

Системы координат ПЗ-90, ПЗ-90.11 и WGS-84 являются геоцентрическими: начало координат — точка O (рис. 2) совпадает с центром масс Земли.

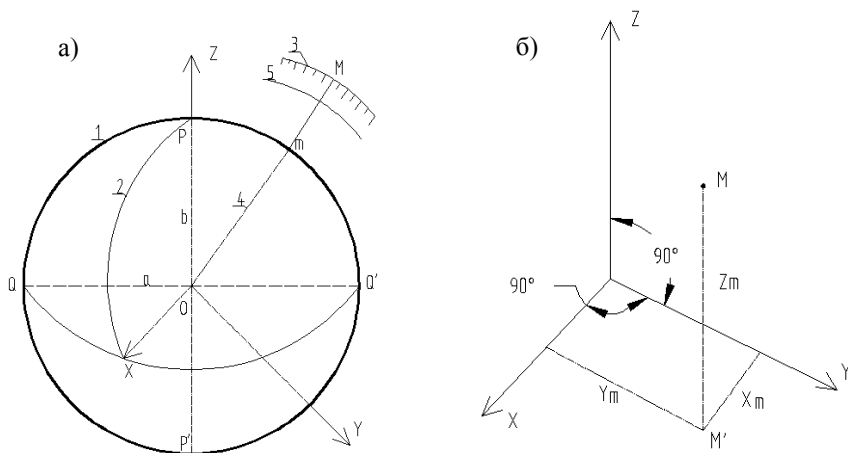


Рис. 2. Общемировые (мировые) системы пространственных прямоугольных координат ПЗ-90, WGS-84: PP' — ось вращения Земли; QQ' — земной экватор; a и b — соответственно большая и малая полуоси земного эллипсоида; 1 — геодезический (эллипсоидальный) меридиан точки M физической поверхности Земли; 2 — Гринвичский меридиан; 3, 4 — нормаль к поверхности эллипсоида, проведенная через точку M ; 5 — поверхность квазигеоида; m — проекция точки M на поверхность эллипсоида; M' — проекция точки M на плоскость XOY

Ось X направлена из центра Земли в точку пересечения земного экватора QQ' с начальным (Гринвичским) меридианом. Ось Y , лежащая в плоскости экватора, отстоит от оси X на 90° . Ось Z направ-

лена по полярной (северной, близ полярной звезды) полуоси b отсчетного земного эллипсоида ПЗ-90 или WGS-84 на рисунке 2б показаны пространственные прямоугольные координаты точки M физической поверхности Земли, положение которой определяется по результатам наблюдений спутников, спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. При этом наблюдения ведут с Земли, используя спутниковые приемники.

Сделаем несколько замечаний об ориентировке осей и различиях координатных систем ПЗ-90 и WGS-84. Направления осей относительно звезд были узаконены на XIV Генеральной ассамблее Международной ассоциации геодезии (МАГ) в 1967 г. [20]. Ось Z совмещена со средней осью вращения Земли на среднюю эпоху 1900-1905 гг. Пространственное положение средней оси вращения Земли относительно звезд с учетом нутации и прецессии на вышеуказанное время получило название Международного условного начала (МУН) — Conventional International Origin (CIO). Иногда МУН называют условным земным полюсом (УЗП). Положение мгновенного полюса (на реальный момент времени) относительно принятого МУН определяют по результатам регулярных радиоинтерферометрических измерений (Very Long Baseline Interferometry) [1, 12, 33, 41].

Положение начального меридиана (начало отсчета ординат и долгот) задается принятыми долготами международных и национальных служб времени на средний период 1900-1905 гг., узаконенными МАГ. За начало отсчета ординат Y и долгот принят центр A Гринвичской обсерватории (вблизи Лондона).

Хотя мировые (глобальные) координатные системы ПЗ-90 и WGS-84 построены на одних и тех же принципах (центр масс Земли совпадает с началом координат; ось Z направлена по оси вращения Земли, ордината Y отсчитывается от плоскости Гринвичского меридиана), между ними имеются и различия. Первым различием является несоответствие начал координат, смещенных относительно друг друга на величины: $x_0 = -1,08$ м; $y_0 = -0,27$ м; $z_0 = 0,90$ м [1, 12, 41]. Второе различие заключено в развороте оси Z на малый

угол $\omega_z = -0,16$ сек. В-третьих, различаются и линейные масштабы обеих систем на величину $m = -0,12$ [12].

Преобразования пространственных прямоугольных координат системы ПЗ-90 (используются в спутниковой системе ГЛОНАСС) в мировую систему пространственных прямоугольных координат WGS-84 (применяется в спутниковой системе GPS) осуществляют по формулам, приведенным в [1, 12, 41] при использовании программного продукта «Геомастер».

Любые координатные преобразования в программном пакете «Геомастер» начинают с перевода координат заданной (исходной) системы в мировую систему WGS-84, а затем в искомую. Например, если нужно перевести координаты из системы «А» в систему «Б», то выполняется такая цепочка преобразований [41]:

$$"A" \rightarrow \text{WGS 84} \rightarrow "B". \quad (1)$$

При использовании других программных продуктов необходимо убедиться в том, что параметры ориентирования обеих систем (исходной и искомой) заданы в системе координат WGS-84. В качестве параметров ориентирования используют три параметра линейного смещения DX, DY, DZ по каждой из осей X, Y и Z , три значения малых углов вращения $RX = \omega_x, RY = \omega_y, RZ = \omega_z$ вокруг каждой из этих осей и общую поправку $Scale$ к единичному масштабному множителю [41].

Координатное преобразование исходной системы прямоугольных координат X', Y', Z' в систему координат WGS-84 (X, Y, Z) имеет вид [41]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DX \\ DY \\ DZ \end{bmatrix} + (1 + Scale \cdot 10^{-6}) \cdot \begin{bmatrix} 1 & RZ & -RY \\ -RZ & 1 & RX \\ RY & -RX & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В геодезической практике, в т. ч. Военно-топографической службой, наряду с геоцентрической системой координат (ПЗ-90 и WGS-84), используется топоцентрическая система. В этой системе

начало координат находится на земной поверхности, а плоскость XOY обычно принимается параллельной плоскости земного экватора. Координатная ось Z параллельна оси вращения Земли. Тогда пространственные топоцентрические координаты будут равны разности геоцентрических координат пункта и начала координат топоцентрической системы [12].

§ 2. Единая Международная Система Пространственных Геоцентрических Координат — ITRS

Развитие международных связей, обеспечение навигации Международной космической станции, мониторинг движения литосферных плит Земли и пр., как замечено во Введении, вызвали необходимость введения в геодезическую практику Единой Международной системы координат — ITRS. На 1997 г. ITRS была закреплена 16-ю наземными постоянно действующими станциями (пунктами) Международной спутниковой Геодезической сети ITRF [1, 12, 59]. На 2005 г. ITRF уже включила в себя около 200 постоянно действующих наземных станций. Именно на основе ITRF будет развиваться Международная спутниковая система Galileo, которая заменит мировые, но обособленные спутниковые системы ГЛОНАСС, GPS и DORIS [1, 12, 51, 60].

Точность ITRF постоянно повышается при совместном применении современных высокоточных методов космической геодезии и астрономии с широким использованием спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и DORIS, радиоинтерферометрических измерений сигналов внегалактических объектов (источников космических излучений) со сверхдлинных баз. При обработке результатов этих наблюдений используются современные программные продукты и мощные ЭВМ [1, 41, 58-60].

Система координат ITRS является инерциальной, т. е. независимой от вращения Земли вокруг своей оси. Напомним, что, по определению, инерциальной принято называть систему координат, являющуюся неподвижной относительно другой постоянной или равномерно движущейся в пространстве системы [1, 54]. Система

координат ITRS жестко связана с другой инерциальной системой координат — ICRS (Международной небесной опорной системой, см. Введение и главу 4 § 6).

Система координат ITRS есть инерциальная пространственная геоцентрическая прямоугольная координатная система с началом координат в центре масс Земли, не зависящая от значений параметров какого-либо земного эллипсоида. Как и в любой геоцентрической прямоугольной системе координат, ось Z направлена по оси вращения Земли (см. рис. 2). Ось X , лежащая в плоскости небесного экватора, направлена в точку весеннего равноденствия — точку пересечения небесного экватора и эклиптики. Ось Y , также расположенная в плоскости небесного экватора и отстоящая от оси X на 90° , дополняет координатную систему до правой.

Ориентировка оси Z в космическом пространстве в системе координат ITRS выполнена на эпоху 1984 г., а не на эпоху 1900-1905 гг. (как это сделано для мировых координатных систем ПЗ-90, WGS-84 и GRS 80).

Регулярно, но не реже одного раза в три года, в положение оси Z относительно объектов далеких галактик, в т. ч. квазаров — пульсирующих космических объектов, и ориентировку оси X вводят поправки за динамику (изменение) параметров земной и лунной орбит, давление литосферных плит, вызывающие смещение центра масс Земли. Как указано во введении, определением этих поправок занимается Международная служба Земли — IERS.

§ 3. РЕФЕРЕНЦНЫЕ ПОДСИСТЕМЫ КООРДИНАТ В СК-95, ОТНЕСЕННЫЕ К ЭЛЛИПСОИДУ КРАСОВСКОГО

3.1. Общие положения

Из практических соображений (для уменьшения погрешностей изображения сфероидической поверхности Земли на плоскости в заданной картографической проекции) отдельные государства (группы их) принимают за основную отсчетную поверхность при

обработке геодезических измерений поверхность относительного (государственного) земного эллипсоида. Как указывалось выше, такой частный эллипсоид принято называть референц-эллипсоидом¹.

В СССР введен в 1946 г. референц-эллипсоид с параметрами $a = 6378245$ м и $\alpha = 1:298,3$ (эллипсоид Красовского). Величины a и α вычислены по астрономо-геодезическим наблюдениям на период 1942 г. [35, 41].

К эллипсоиду Красовского были отнесены две системы координат 1942 г.: геодезические широты B и долготы L ; плоские прямоугольные зональные координаты X и Y в проекции Гаусса-Крюгера. Высоты относительно геоида отсчитывались в Балтийской системе высот 1942 г. [41].

К 1995 г. в результате уравнивания космической геодезической сети (КГС), включающей 33 пункта (см. главу 2 § 1), Допплеровской геодезической сети (ДГС), состоящей из 131 пункта, и астрономо-геодезической сети СССР (АГС) получены новые значения координат пунктов государственной геодезической сети (ГГС). Использованная при совместном уравнивании АГС на 1995 г. включала в себя: 164 306 пунктов триангуляции, трилатерации и полигонометрии 1-го и 2-го классов; 3, 6 тысяч геодезических азимутов, определенных из астрономических наблюдений; 2, 8 тысяч базисных сторон, расположенных через 170-200 км [41]. В уравнивание КГС, ДГС и АГС были включены данные о геодезических высотах H_G пунктов земной поверхности над эллипсоидом Красовского. Значения высот H_G получены как сумма нормальных высот и высот квазигеоида. Последние определены по результатам гравиметрических и астрономических наблюдений с условием распределения масс внутри Земли по нормальному закону Молоденского [30, 41].

Уравнивание ГГС выполнено в пространственной прямоугольной системе координат. За опорную систему, в которой вычислены

¹ Бугаевский, Л. М. Математическая картография : монография. — М. : Златоуст, 1998. — 400 с.

окончательные (полученные из уравнивания) значения координат 134 опорных (базовых) пунктов, была выбрана система координат КГС. То есть была построена геодезическая сеть, содержащая 134 пункта при среднем расстоянии между смежными пунктами 400-500 км.

Сеть из указанных 134 геодезических пунктов послужила жесткой основой для заключительного уравнивания 164 306 пунктов триангуляции, трилатерации и полигонометрии 1-го и 2-го классов АГС, выполненного в 1995 г. [41].

Точность определения взаимного планового положения 164 306 пунктов АГС на 1995 г. характеризуется такими средними квадратическими погрешностями [41]: 0,03 м — при расстояниях между пунктами до 50 км; 0,04 м — при расстояниях между пунктами от одной до десяти тысяч км.

Результаты уравнивания ГГС были узаконены юридически Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. № 586 «Об установлении единых государственных систем координат». Введена новая система координат СК-95 для использования при производстве геодезических и картографических работ, начиная с 1 июля 2002 г. взамен СК-42, введенной в 1946 г.

В СК-95 за отсчетную поверхность принят (сохранен) эллипсоид Красовского. При этом главные оси и плоскости (малая ось эллипсоида, плоскость начального меридиана, плоскость земного экватора) параллельны координатным осям системы ПЗ-90 [35, 41].

Положение пунктов геодезических сетей в СК-95 задается следующими координатами [41]:

- пространственными прямоугольными координатами X' , Y' , Z' ;
- геодезическими координатами: геодезической широтой — , геодезической долготой — L и геодезической высотой — H_G ;
- зональными плоскими прямоугольными координатами — X и Y , вычисляемыми в проекции Гаусса-Крюгера в координатных зонах;
- нормальными высотами — H , отсчитанными от поверхности квазигеоида в Балтийской системе высот 1977 г.

Введение СК-95 позволяет улучшить следующие показатели ГГС по сравнению с СК-42 [41]:

- повысить точность передачи координат на расстояния свыше 1000 км в 10-15 раз и точность взаимного положения смежных пунктов в 2-3 раза;
- обеспечить одинаковую точность распределения системы координат для всей территории России и стран СНГ;
- практически исключить региональные деформации ГГС, достигающие в Системе координат СК-42 нескольких метров;
- создать высокоэффективную систему геодезического обеспечения на основе спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS.

Вопросы перехода от системы координат СК-42 к СК-95 подробно освещены в отечественной технической литературе [1, 12, 41]. При этом в основном использовались следующие программные продукты: «Геомастер» (Россия) и Pinnacle (Япония, фирма Topcon) [41]. Можно использовать для этой цели и программные продукты Credo Dat, Геодат и последние версии MapInfo после незначительной их модификации.

Совершенствование спутниковых технологий создания ГГС в дальнейшем позволило, кроме того, решать следующие практические задачи:

- передавать координаты X , Y и Z (пространственные прямоугольные, отнесенные к центру масс Земли) практически на любые расстояния с требуемой для практических нужд точностью;
- снизить затраты на построение ГГС в связи с отсутствием необходимости сооружения геодезических знаков и уменьшить риск при выполнении работ в труднодоступных и климатически сложных районах Российской Федерации и СНГ.

С 28 декабря 2012 г. введена на территории РФ геодезическая система координат 2011 г. (ГСК-2011). Срок действия СК-95 продлен до 1 января 2017 г. [61].

Система координат ГСК-2011 опирается на фундаментальную астрономо-геодезическую сеть, которая служит исходной геодезической основой для построения заполняющих спутниковых сетей и практически реализует геоцентрическую систему координат в рамках решения задач координатно-временного обеспечения.

Погрешность привязки ГСК-2011 к центру Земли и разворотов относительно Международной земной системы координат характеризуется величиной 0,1 м. Погрешность относительной привязки постоянно действующих пунктов ФАГС составляет 0,02 м. Погрешность ГСК-2011, реализуемой системой ГЛОНАСС, характеризуется величиной 0,1 м. Погрешность определения высот квази-геоида составляет 0,2 м.

3.2. Референция подсистема геоцентрических координат в СК-95

Референция подсистема геоцентрических прямоугольных координат X' , Y' , Z' тесно связана и близка к мировой системе координат ПЗ-90. Координатные оси $O'X'$, $O'Y'$ и $O'Z'$ параллельны соответствующим осям OX , OY , OZ системы координат ПЗ-90 (рис. 3), а начало координат O' смещено относительно начала O на величины: $\Delta x_0 = 25,90$ м; $\Delta y_0 = -130,94$ м; $\Delta z_0 = -81,76$ м [41, прил. 1].

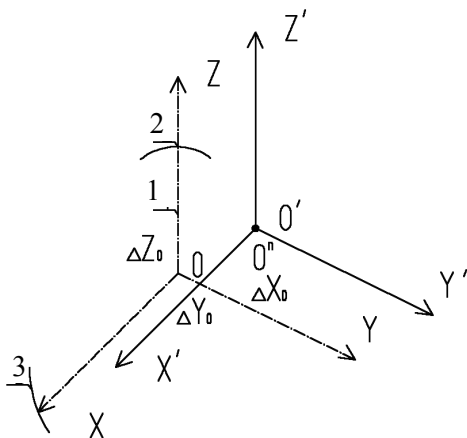


Рис. 3. Референция системы пространственных прямоугольных координат:
 O' — начало координат; O'' — проекция O' на плоскость $X'O'Y'$;
 1 — ось вращения Земли (малая ось общего земного эллипсоида — 2);
 3 — Гринвичский меридиан

Координаты X' , Y' , Z' точек земной поверхности в системе СК-95 могут быть вычислены по выражениям [41]:

$$\left. \begin{aligned} X' &= X - 25,90 \text{ м;} \\ Y' &= Y + 130,94 \text{ м;} \\ Z' &= Z + 81,76 \text{ м.} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь X , Y и Z — пространственные прямоугольные координаты точек земной поверхности в системе ПЗ-90, определенные по результатам спутниковых наблюдений.

Подсистема пространственных прямоугольных координат X' , Y' и Z' (СК-95) привязана к эллипсоиду Красовского (референц-эллипсоиду) с параметрами $a = 6378245$ м, $\alpha = 1:298,3$. Начало координат O' этой подсистемы не совпадает с центром масс Земли. Референц-эллипсоид введен в 1946 г. в целях уменьшения неизбежных искажений при изображении сфероидической земной поверхности на территории России на плоскости (топографических картах) в проекции Гаусса-Крюгера [8, 25-28, 47].

Общеземной эллипсоид с параметрами $a = 6378136$ м, $\alpha = 1:298,257839$ и привязанная к нему мировая (общеземная) система пространственных прямоугольных координат ПЗ-90 введен в 2000 г. с целью получения наименьших искажений при изображении всей земной поверхности на топографических картах в выбранной проекции (см. главу 2 § 1).

3.3. Референцная подсистема геодезических (эллипсоидальных) координат B , L , H_{Γ} в СК-95

Подсистема геодезических (эллипсоидальных) координат, отнесенная к эллипсоиду Красовского, определяется геодезической широтой B , геодезической долготой L и геодезической высотой H_{Γ} . Она разработана для обозначения углов трапеций в Международной разграфке топографических карт, обработки обширных астро-

номо-геодезических сетей, решения навигационных и других задач, связанных с большими расстояниями.

Геодезическая широта B — угол между нормалью (перпендикуляром) к поверхности эллипсоида Красовского, проведенной через точку M земной поверхности, и плоскостью земного экватора (рис. 4).

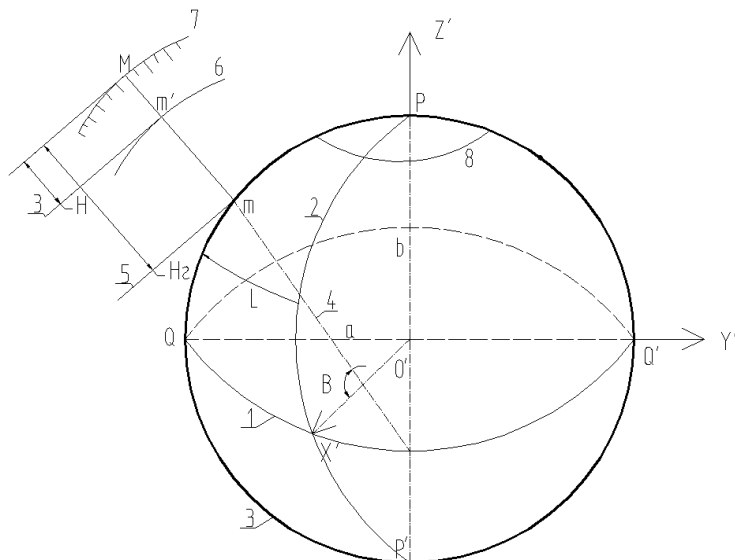


Рис. 4. Референсная подсистема геодезических координат в СК-95 и ее связь с референсными пространственными прямоугольными координатами: a и b — соответственно большая и малая полуоси образующего эллипсоида; O' — начало референчных пространственных прямоугольных координат X', Y', Z' ; m и m' — проекции точки M соответственно на поверхности эллипсоида и квазигеоида; PP' — ось вращения Земли; Q и Q' — точки пересечения геодезического (эллипсоидального) меридиана точки M и земного экватора (окружности); 1 — земной экватор; 2 — начальный (Гринвичский — эллипсоидальный) меридиан; 3 — геодезический меридиан точки M ; 4 — нормаль, опущенная из точки M на поверхность эллипсоида; 5 — касательная к поверхности эллипсоида в точке m ; 6 — поверхность квазигеоида; 7 — физическая поверхность Земли; 8 — геодезическая параллель точки M

Геодезические широты отсчитывают в градусной мере от земного экватора в обе стороны от его плоскости в пределах $0^\circ - 90^\circ$. Точки Земли, расположенные к Северному полюсу P (см. рис. 4), имеют северные широты, к Южному полюсу P' — южные широты. Применяют и такие оцифровки широт B : положительные широты лежат в северном полушарии от 0° до 90° ; отрицательные широты от 0° до 90° — в южном полушарии [44].

Геодезическая долгота L — двугранный угол, образованный плоскостью начального (нулевого, $L = 0^\circ$) меридиана и плоскостью геодезического меридиана исследуемой точки (точки M на рис. 4) земной поверхности. За нулевой меридиан принят Гринвичский на период 1905 г. по решению МАГ (см. главу 2 § 1). Величины L отсчитывают в градусах от Гринвичского меридиана в обе стороны его в пределах $0^\circ - 180^\circ$. Точки, расположенные восточнее нулевого меридиана, имеют восточные долготы, западнее его — западные долготы. Применяют и сплошную оцифровку геодезических долгот от 0° до 360° : от 0° до 180° в восточном полушарии; от 180° до 360° — в западном полушарии [35].

Дадим определения геодезической параллели и геодезического меридиана.

Геодезической параллелью называют окружность круга, параллельного плоскости земного экватора. Параллель строится на поверхности земного эллипсоида проекцией m точки M физической поверхности Земли при ее суточном вращении вокруг своей оси (см. рис. 4). Для точек, лежащих на одной параллели, геодезическая широта B есть постоянная величина.

Геодезическим меридианом принято называть линию (кривую 2-го порядка — эллипс) пересечения плоскости, проведенной через ось вращения Земли PP' (прямую, параллельную оси вращения Земли в референционной системе координат) и нормалью 4 точки M к поверхности земного отсчетного эллипсоида с его поверхностью (см. рис. 4), т. е. геодезический меридиан равен половине следа сечения эллипсоидальной плоскостью, проведенный через малую ось b и проекцию m точки M поверхности референц-эллипсоида.

Геодезическая высота — H_G (см. рис. 4) — расстояние Mm , отсчитанное по нормали 4 от физической точки M до поверхности эллипсоида. По определению, при введении вспомогательной поверхности квазигеоида, величину H_G вычисляют по формуле [12, 41]:

$$H_G = H + \xi, \quad (4)$$

где H — нормальная высота точки M (отсчитана от поверхности квазигеоида до точки M); ξ — высота квазигеоида, определяемая по результатам гравиметрических и астрономо-геодезических наблюдений, как расстояние по нормали 4 (см. рис. 4) между поверхностями референц-эллипсоида и квазигеоида.

Геодезические координаты B , L и H_G по измеренным спутниковым методам пространственным прямоугольным координатам X , Y и Z вычисляют по следующему алгоритму [22, 41]:

- вычисляется вспомогательная величина D :

$$D = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad (5)$$

- выполняется анализ величины D .

Если $D = 0$, то координаты B , L и H_G примут значения:

$$B = \frac{\pi \cdot z}{2|z|}, \quad L = 0, \quad H_G = z \cdot \sin B - a\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}. \quad (6)$$

Если $D > 0$, то вычислив вспомогательную величину L_a

$$L_a = \arcsin \frac{y}{D}, \quad (7)$$

рассматривают следующие пять возможных вариантов:

- а) при $x > 0$, $y < 0$, $z \neq 0$ — B и H_G вычисляют по формулам (6), а долготу L получают из выражения:

$$L = 2\pi - L_a; \quad (8)$$

б) при $x' < 0$, $y < 0$, $z \neq 0$ — B и H_Γ находят по формулам (6), а величину L — из выражения:

$$L = 2\pi - L_a; \quad (9)$$

в) при $x' < 0$, $y' > 0$, $z \neq 0$ — B и H_Γ вычисляют по формулам (6), а величину L — из выражения:

$$L = \pi - L_a; \quad (10)$$

г) при $x' < 0$, $y' > 0$, $z \neq 0$ — B и H_Γ определяют из выражений (6), а долготу L — по формуле:

$$L = L_a; \quad (11)$$

д) при $x' \neq 0$, $y' \neq 0$, $z = 0$ — B , L и H_Γ получают значения:

$$B = 0, H_\Gamma = D - a. \quad (12)$$

Долготу L вычисляют в этом случае по одной из формул (8-11) в соответствии со значениями x' и y' . Величина π в градусной мере равна 180° .

Обратный переход от геодезических координат B , L и H_Γ к референцным пространственным прямоугольным координатам X' , Y' и Z' осуществляется по формулам [22, 41]:

$$\left. \begin{aligned} X' &= (N + H_\Gamma) \cos B \cdot \cos L \\ Y' &= (N + H_\Gamma) \cos B \cdot \sin L \\ Z' &= [(1 - e^2)N + H_\Gamma] \sin B \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где N — радиус кривизны первого вертикала (см. глоссарий);

e — эксцентриситет отсчетного эллипсоида.

Величины N и e вычисляют по формулам [35, 41]:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}; \quad (14)$$

$$e^2 = 2\alpha - \alpha^2. \quad (15)$$

В выражениях (14) и (15) a и α — большая полуось и полярное сжатие образующего эллипса для эллипсоида Красовского, соответственно равные: $a = 6378245$ м; $\alpha = 1:298,3^2$.

Сделаем несколько замечаний об использовании в геодезической практике общеземных (глобальных) пространственных прямоугольных геоцентрических координат X, Y, Z в системах ПЗ-90, WGS-84, ITRS 2000, их референцных (региональных) аналогов X', Y', Z' в системах СК-95, NAD 83 и ETRS, а также объясним необходимость введения сфероидических (эллипсоидальных) пространственных координат B, L и H_L .

По сложившейся практике геодезического обеспечения нужд обороны и народного хозяйства отдельных стран (Россия, США), групп стран-регионов (бывший СССР, страны Западной Европы) параллельно используются, в основном, две мировых (глобальных, т. е. охватывающих всю планету Земля и околоземное пространство) системы координат: ПЗ-90 и WGS-84. Эти системы координат являются геоцентрическими (начало координат совмещено с центром масс Земли, а координатная ось Z совпадает с положением в пространстве оси вращения Земли на определенную эпоху) (МУН на период 1900-1905 гг.). Системы координат ПЗ-90 и WGS-84 закреплены пунктами КГС (космической геодезической сети) на поверхности Земли: для ПЗ-90 — 35 пунктами [41]; для WGS-84 — 55 пунктами [57].

Системы координат ПЗ-90 и WGS-84 жестко привязаны к общеземным эллипсоидам, геометрические центры которых совпадают с центром масс Земли и с началами координат, а малые оси их совпадают с координатными осями Z . Параметры общего земного эллипсоида ПЗ-90, используемые в глобальной навигационной спутниковой системе ГЛОНАСС (Россия), и общего земного эллипсоида WGS-84, используемые в глобальной спутниковой сис-

² Давыдов, В. П. Картография : учебник / В. П. Давыдов, Д. М. Петров, Т. Ю. Терешенко. — СПб. : Проспект Науки, 2010. — 208 с.

теме позиционирования GPS (США), приведены в главе 1 § 2. Параметры названных эллипсоидов (большая полуось и полярное сжатие, определенные на период 1990 г. для ПЗ-90 и 1984 г. для WGS-84) отличаются на малые величины. Краткий алгоритм перевода пространственных прямоугольных координат ПЗ-90 в WGS-84 описан в главе 2 § 1.

За рубежом, кроме систем координат WGS-84, используют, как указано во Введении, третью мировую систему координат GRS 80, обеспечивающую навигацию спутников Допплеровской навигационной радиотехнической системы DORIS (Франция), референчные системы координат ETRS (Западная Европа) и NAD 83 (Канада и США) [1, 7, 57-59].

Мировая система координат GRS 80 отнесена к общеземному эллипсоиду с параметрами: большой полуосью $a = 6378137$ м и полярным сжатием $\alpha = 1:298,2572210$ [1, 56, 57]. Разница параметров систем координат GRS 80 и WGS-84 незначительна — на две единицы в шестом знаке после запятой в величине полярного сжатия. Данных о параметрах референц-эллипсоидов, используемых для реализации систем координат ETRS и NAD 83, очень мало: известно лишь, что референчная система координат NAD 83 (США и Канада) отнесена к референц-эллипсоиду Кларка с параметрами: большой полуосью $a = 6378206,4$ м и полярным сжатием $\alpha = 1:294,978698$ [1].

Дадим краткую характеристику спутниковой навигационной системы DORIS, мало описанной в технической литературе. Спутниковая система DORIS запущена в работу в 1994 г. специалистами Франции. Она представляет собой радиогеодезическую систему, работающую на двух частотах сантиметровых электромагнитных волн (радиоволны сантиметрового диапазона). В отличие от спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, приемные устройства установлены на спутниках, а передатчики, работающие в автоматическом режиме — на земных станциях [7, 12].

Мировые системы координат ПЗ-90, WGS-84 и GRS 80 связаны с Единой Международной системой координат ITRS. Последняя

базируется на Международной небесной опорной координатной системе ICRS.

3.4. Зональные плоские прямоугольные координаты X и Y в проекции Гаусса-Крюгера

Как указывалось выше, для изображения сфероидической поверхности отсчетного земного эллипсоида (эллипсоида Красовского, принятого в России) на плоскости (топографических планах и картах) с допустимыми для практического применения искажениями поверхность эллипсоида Красовского поделена геодезическими меридианами на 60 координатных зон по долготе 6° каждая [28, 32, 33].

Геодезическая долгота L_0 осевого (среднего) меридиана координатной зоны с порядковым номером n' определяется из выражения [28]:

$$L_0 = 6^\circ \cdot n' - 3^\circ. \quad (16)$$

В Российской Федерации и ряде других стран для перехода от геодезических (пространственных, но негеоцентрических) координат B и L к плоскости прямоугольных координат X и Y используется поперечная цилиндрическая равноугольная картографическая проекция (в дальнейшем, проекция Гаусса-Крюгера), которая характеризуется следующими условиями [7, 28]:

- сохраняет равенство соответствующих углов на поверхности эллипсоида Красовского и на плоскости;
- сохраняет подобие бесконечно малых фигур;
- преобразование координат осуществляется в пределах каждой из 60-ти координатных зон, ограниченных западным и восточным геодезическими меридианами с долготами, кратными 6° ;
- масштаб проекции вдоль осевого меридиана координатной зоны равен единице;
- масштаб проекции вдоль изображения линии земного экватора отличается от единицы в сторону его увеличения;

- осевой меридиан каждой координатной зоны и линия земного экватора изображаются на плоскости двумя перпендикулярными прямыми.

Каждая шестиградусная зона нумеруется арабской цифрой (от 1 до 60). На территории Российской Федерации принята нумерация зон Гаусса, отличающаяся от международной на 30 единиц. То есть территория России располагается в 4-32 координатных зонах в государственной нумерации (34-60, 1 и 2-й в международной нумерации) с долготами осевых меридианов, отсчитанных от Гринвичского (нулевого) меридиана, соответственно: для четвертой западной зоны 21° ; для 32-й восточной зоны 189° при счете долгот от 0° до 360° . При применении счета восточных и западных долгот относительно нулевого (начального) меридиана осевые меридианы координатных шестиградусных зон с номерами 4 и 32 в российской нумерации будут иметь значения: для четвертой зоны 21° восточной долготы; для 32-й зоны, соответственно, — 171° западной долготы (рис. 5).

По охватываемой территории 6-градусные по долготе координатные зоны совпадают с колоннами Международной разграфки карт с разницей нумерации на 30 единиц. То есть, чтобы узнать номер колонны Международной разграфки карты масштаба 1:1 000 000, принятого в качестве исходного, в которой расположена заданная точка, необходимо выполнить следующие операции [9]:

- определить геодезические долготы L_z и L_b граничных меридианов координатной зоны, кратные 6° : L_z должна быть меньше долготы L заданной точки, а L_b — больше величины L . Например, $L = 22^\circ 33' 25''$. Тогда $L_z = 18^\circ$, а $L_b = 24^\circ$;

- вычислить долготу осевого меридиана L_0 , как среднюю величину из значений L_z и L_b . В нашем примере $L_0 = 21^\circ$;

- найти номер координатной зоны Гаусса-Крюгера n' по российской нумерации, подставив значение $L_0 = 21^\circ$ в формулу (16).

Для нашего примера найдем: $n' = (21^\circ + 3^\circ) / 6 = 4$;

• определить номер колонны n по Международной разграфке карт, используя выражение:

$$n = n' + 30. \quad (17)$$

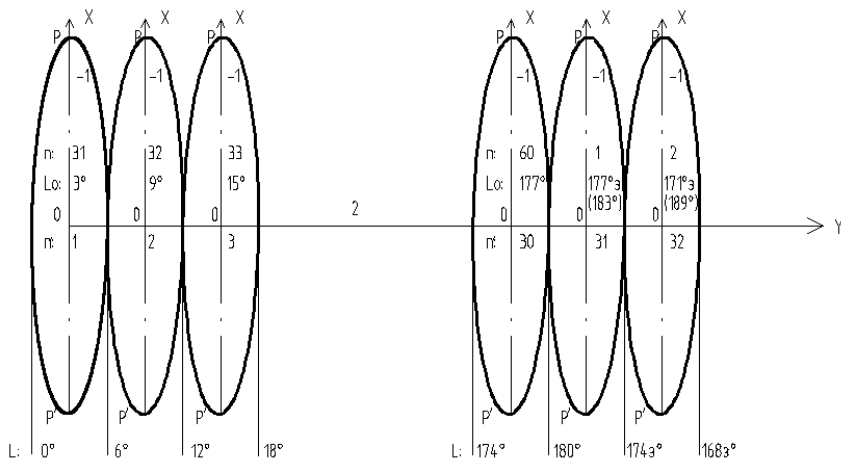


Рис. 5. Схема нумерации координатных зон Гаусса-Крюгера, принятой в СК-95 (России) и колонн Международной разграфки карт:

1 — проекция осевого меридиана зоны на плоскость; 2 — проекция земного экватора на плоскость; O — начало координат в каждой зоне; P — Северный полюс Земли; P' — Южный полюс Земли;

L_0 — геодезическая долгота осевого меридиана; L — геодезическая долгота граничного меридиана зоны; n' — номер координатной зоны по нумерации, принятой в СК-95; n — номер колонны Международной разграфки карт; X и Y — плоские прямоугольные координаты точек, заданные в системе координат XOY в каждой отдельно взятой координатной зоне Гаусса-Крюгера; координатные зоны с номерами 31 и 32 будут иметь осевые меридианы с долготами $L_0 = 183^\circ$ и $L_0 = 189^\circ$ при сплошной оцифровке меридианов от 0° до 360°

Для нашего примера найдем: $n = 4 + 30 = 34$. Если $n > 60$ при вычислениях, то из полученного значения n нужно вычесть 60.

Сделаем такое замечание: номера колонн и геодезические долготы их граничных меридианов, принятые в России, совпадают с Международной классификацией. Номера координатных 6° -х зон, используемых в России, отличаются от Международных на 30 (см. рис. 5). То есть международные координатные зоны совпадают в своей нумерации и по физическому положению с колоннами Международной разграфки карт.

В каждой координатной зоне Гаусса-Крюгера введена своя система плоских прямоугольных координат X и Y (см. рис. 5). Чтобы не иметь дело с отрицательными значениями ординат Y , договорились к ординате начала координат добавлять 500 км, а измененные Y' назывались условными ординатами.

Если подсистема эллипсоидальных (как указано выше, их принято называть геодезическими) координат, в частности, геодезические широты B и геодезические долготы L , закреплена на углах трапеций (листов) издаваемых для практических целей топографических карт, то плоская подсистема прямоугольных координат X и Y реализована на листах карт в виде сетки квадратов. Так как стороны сеток для масштабов карт 1:50 000, 1:25 000 и 1:10 000 соответствуют расстояниям на земной поверхности, равным 1 км, координатные сетки на картах этих масштабов называют километровыми. В масштабах карт стороны километровых координатных сеток равны: 10 см для листов карт масштаба 1:10 000; 4 см — масштаба 1:25 000; 2 см — масштаба 1:50 000.

Километровая координатная сетка зональных координат X и Y покрывает всю площадь листа (трапеции) топографической карты, а также фиксируется тонкими черными штрихами между внешней и внутренней рамкой листа карты.

Различают четыре стороны листа топографических карт: северную, над которой подписана номенклатура; южную, под которой размещен масштаб карты в трех формах — численной, текстовой (именованной) и графической; западную и восточную стороны, определяемые относительно северного направления: западная сторона расположена слева от северного направления, а восточная — справа.

Если геодезические широты и долготы показаны по четырем углам листа топографической карты в градусной мере, то зональные координаты (плоские прямоугольные) X и Y закреплены на штрихах километровой сетки между внешней и внутренней рамкой его. Величины X и Y заданы в километрах. При этом, на территории России абсцисса X отсчитывается от линии изображения земного экватора 2 к Северному полюсу Земли P (см. рис. 5) и подписывается в километрах. Величина X возрастает от южной (нижней) рамки к северной. На линии земного экватора $X = 0$.

Иначе дело обстоит с плоскими зональными ординатами. Как уже указывалось, к действительной ординате Y принято добавлять 500 км. Поэтому на всех топографических картах подписывают выходы вертикальных линий километровых сеток (параллельных проекции осевого геодезического меридиана используемой координатной зоны) значениями условных ординат Y' . Величины Y' указывают также в километрах, но перед значением Y' ставят номер координатной зоны n' по российской нумерации от 1 до 60. Для контроля нумерации координатных зон используют число во второй позиции номенклатуры листа карты (см. северную — верхнюю сторону листа карты). Это число, фиксирующее номер колонны Международной разграфки карт, должно отличаться от номера координатной зоны Гаусса-Крюгера на величину ± 30 (см. (17)). Значения условных ординат возрастают на листе карты с запада на восток и подписаны вдоль горизонтальных линий северной и южной сторон трапеции.

3.5. Определение геодезических и зональных координат по топографической карте

На рисунке 6 изображен фрагмент северо-западного угла листа (трапеции) топографической карты масштаба 1:10 000, имеющего учебную номенклатуру У-35-38-А-в-3. Ситуация и рельеф на листе не показаны.

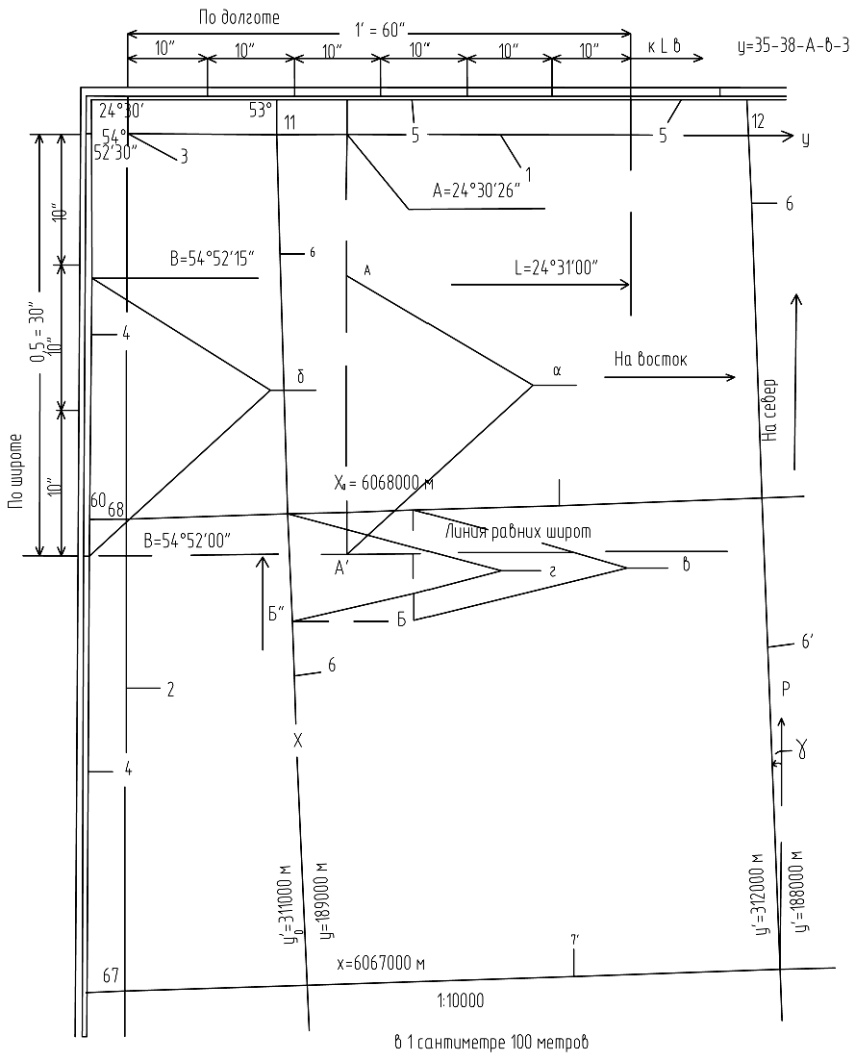


Рис. 6. Фрагмент северо-западного угла трапеции (листа) учебной топографической карты масштаба 1:10 000

Как указывалось выше, лист топографической карты стандартных масштабов, являющийся в геометрическом представлении трапецией, ограничен снизу и сверху проекциями геодезических параллелей, а слева и справа — проекциями геодезических меридианов, отнесенных к референц-эллипсоиду Красовского (см. главу 1 § 2). При работе с крупномасштабными (1:5000 и 1:10 000) и среднемасштабными (1:25 000 и 1:50 000) картами граничные дуги геодезических параллелей и меридианов на трапециях заменяют стягивающими их хордами [8].

Геодезические широты B и геодезические диагонали L заданной на трапеции точки могут быть определены следующим образом:

- прочерчиваем карандашом вспомогательные линии равных широт и равных долгот, соответствующие ближайшим к заданной точке A минутным делениям шкал широт и долгот, размещенным по четырем границам рамки трапеции (см. рис. 6);

- проектируем точку A на линию равных широт прямой AA' , параллельной граничному меридиану 2;

- взяв в растров измерителя отрезок AA' (положение a), по шкале широт 4 определяем значение широты точки A . В нашем случае $B_A = 54^\circ 52' 15''$ (положение δ измерителя на рис. 6);

- также при помощи измерителя по шкале долгот 5 от линии равных долгот 2 находим долготу точки A , равную $L_A = 24^\circ 30' 26''$. Для контроля можно определить B_A и L_A , используя линии равных широт и равных долгот, соответствующие значениям $B_A = 54^\circ 52' 30''$ и $L_A = 24^\circ 31' 00''$.

Зональные координаты X и Y заданной на трапеции точки B могут быть определены в следующем порядке:

- проектируем ортогонально точку B на ближайшие стороны 6- и 7-километровой сетки прямоугольных координат (см. рис. 6);

- взяв в растров измерителя отрезок BB' , определяем его длину в сантиметрах, BB' получили равным $\ell = 2,28$ см, что в масштабе 1:10 000 будет соответствовать $L = 228$ м ($2,28 \cdot 100$).

На практике для определения величины L используют график поперечного масштаба, выгравированный на масштабной линейке или геодезическом транспорте;

- вычисляем значение абсциссы точки B , используя значение абсциссы линии 7 координатной сетки, ближайшей к нашей точке $X_0 = 6\,068\,000$ м, $X_B = 6\,068\,000 - 228 = 6\,067\,772$ м;

- выполнив аналогичные действия с отрезком BB'' и используя ординату линии 6 координатной сетки, ближайшей к точке B $Y'_0 = 311\,000$ м, находим значение условной ординаты точки B $Y'_B = 311\,000 + 259 = 311\,259$ м. Для контроля зональные координаты X_B и Y'_B можно определить, используя две другие стороны квадрата километров сетки ($6'$ и $7'$ на рис. 6) со значениями: $X = 6\,067\,000$ м и $Y' = 312\,000$ м;

- вычисляем значение действительной ординаты точки B $Y_B = 311\,259 - 500\,000 = -188\,741$ м. Значения действительных ординат точек используются во многих вычислениях при обработке геодезических измерений на земной поверхности, в частности, при вычислении поправок за редуцирование линий с поверхности референц-эллипсоида на плоскость.

3.6. Вычисление зональных (плоских прямоугольных) координат X и Y по геодезическим (эллипсоидальным) B и L

При применении инженерно-цилиндрической равноугольной проекции Гаусса-Крюгера для перехода от поверхности референц-эллипсоида, принятого в России (эллипсоида Красовского), к плоскости шестиградусной координатной зоны Гаусса-Крюгера, зональные координаты X и Y можно вычислить по заданным геодезической широте B и геодезической долготе L точки по выражениям [9]:

$$\left. \begin{aligned} X &= 6367558,4969 \frac{B''}{\rho''} - \{a_0 - [0,5 + (a_4 + a_6 \ell^2) \ell^2] \ell^2 N\} \sin B \cos B; \\ Y &= [1 + (a_3 + a_5 \ell^2) \ell^2] \ell N \cos B. \end{aligned} \right\} (18)$$

В формулах (18) приняты следующие обозначения:

B'' — значение геодезической широты точки в секундах;

$\ell = (L - L_0) / \rho''$, где L_0 — долгота осевого меридиана координатной зоны;

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \text{ где } a = 6378245 \text{ м, } b = 6399698,9018 \text{ м}$$

(большая и малая полуоси эллипсоида Красовского), $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$;

$$a_0 = 32140,404 - [135,3302 - (0,7092 - 0,0040 \cdot \cos^2 B) \cos^2 B] \cos^2 B;$$

$$a_3 = (0,3333333 + 0,001123 \cdot \cos^2 B) \cos^2 B - 0,166667;$$

$$a_4 = (0,25 + 0,00252 \cdot \cos^2 B) \cos^2 B - 0,04166;$$

$$a_5 = 0,0083 - [0,1667 - (0,1968 + 0,0040 \cdot \cos^2 B) \cos^2 B] \cos^2 B;$$

$$a_6 = (0,166 \cdot \cos^2 B - 0,084) \cos^2 B.$$

Точность вычисления координат по формулам (18) равна 0,001 м.

Пример вычисления плоских прямоугольных координат X и Y точки, имеющей геодезические координаты $B = 51^\circ 38' 43,9023''$; $L = 24^\circ 02' 13,1360''$.

Используя методику, описанную в данной главе § 3 пункт 3.4, находим геодезическую долготу осевого меридиана координатной зоны Гаусса-Крюгера $L_0 = 21^\circ$.

Числовые данные примера приведены в нижеследующей таблице.

Вычисление плоских зональных координат по геодезическим B и L

<i>Параметры</i>	<i>Результаты вычислений</i>	<i>Параметры, алгоритм вычислений</i>	<i>Результаты вычислений</i>
$B_{рад}$	0,901384542	a_3	-0,03814988
$\sin B$	0,7841868	a_5	-0,02648123
$\cos B$	0,6205248	$\sin B \cdot \cos B$	0,4866075
$\cos^2 B$	0,3850510	ℓ^2	0,002809566
$\ell_{рад}$	0,053005341	$N \cdot \ell^2$	17957,096
N	6391412,451	$6367558,497 \cdot B$	5739618,7994
a_0	32088,400	X	5728374,726
a_4	0,05497637	$1 + (a_3 + a_5 \ell^2) \ell^2 \ell \cos B$	0,03288760
a_6	-0,00773241	Y	210198,193

Приведенный пример взят из работы [9].

3.7. Местные плоские прямоугольные координаты x и y

При картографировании (создании топографических планов) городов, поселков городского типа (ПГТ) и сельских поселений ранее (до 2000 г.) широко применялась местная система плоских прямоугольных координат x и y [22, 32]. Такое неформальное положение можно объяснить тремя причинами. Во-первых, зональные прямоугольные координаты X и Y , вычисленные по геодезическим широтам B и геодезическим долготам L , были засекречены. Во-вторых, отыскание и восстановление пунктов государственной геодезической сети (ГГС) связано с дополнительными затратами труда и времени. В-третьих, не была разработана технология полевых и камеральных работ по преобразованию местных координат в систему зональных прямоугольных координат ГГС.

Использование спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS для независимого определения координат геодезических пунктов в обще-земной системе координат ПЗ-90 и референционной системе координат СК-95, рассекречивание картографической продукции (топографические карты масштаба 1:25 000 с действительными геодезическими координатами углов трапеций и зональными прямоугольными координатами сегодня доступны для любого пользователя) позволило выполнять все картографо-геодезические, в т. ч. изыскательные и земельно-кадастровые работы в единой системе референционных зональных прямоугольных координат до 01.01.2017 г., а в дальнейшем — в ГСК-2011.

Для преобразования местных координат (это особенно важно для мегаполисов, как Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Новосибирск, Екатеринбург и др.) в систему ГГС разработаны геодезические, картографические инструкции, нормы и правила (ГКИНП) и создана вычислительная база (программные продукты Геомастер, Mapinfo, Credo и др.) [20, 21, 22, 39-43].

В местной системе координат x и y принимают геодезический пункт, расположенный примерно в середине картографируемой территории (города, ПГТ, месторождения и др.) за начальный с координатами x_0, y_0 . Ориентирование (определение дирекционного угла базового — исходного направления с начального пункта на ориентированный пункт) производится в местной системе координат путем привязки к пунктам ГГС. В этом случае разворот координатных осей местной и государственной систем координат $\gamma = 0$. Если такая привязка не производилась, например, при отсутствии вблизи картографируемой территории пунктов ГГС, угол γ вычисляется как разность дирекционных углов нескольких створов, конечные пункты которых имеют координаты и в местной и государственной системах координат [43].

Вычисление зональных прямоугольных координат в шести-градусных зонах X и Y пункта с местными координатами x' и y' , преобразованными из местных координат x и y за поворот коор-

динатных осей и переход от среднего уровня картографируемой территории к уровню Балтийского моря, производится по формулам [43]:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_0 + x' + (2 \cdot Y_0 \cdot f'' \cdot y' + Y_0^2 \cdot f''') \cdot x', \\ Y &= Y_0 + (Y_0 \cdot f'' \cdot y' + Y_0^2 \cdot f''') \cdot y' - Y_0 \cdot f'' \cdot (x')^2 \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

где X_0 и Y_0 — плоские прямоугольные координаты в шестиградусной координатной зоне начального пункта, имеющего местные координаты x'_0 и y'_0 .

Коэффициент f'' вычисляется по формуле [43]:

$$f'' = \frac{1}{2N_0^2}, \quad (20)$$

где N_0 — радиус кривизны сечения первого вертикала в начальном пункте, определяемый из выражения [43]:

$$N_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}. \quad (21)$$

В выражении (21) обозначено: $a = 6378245$ м — большая полуось эллипсоида Красовского; $\alpha = 1:298,3$ — полярное сжатие эллипсоида Красовского, используемое для вычисления эксцентриситета $e^2 = 2\alpha - \alpha^2$; B — широта [41].

Координаты любого пункта x' и y' , преобразованные, как указано выше, за разворот осей местной и государственной систем координат и за переход от среднего уровня H_0 территории города к уровню Балтийского моря $H = 0$, вычисляют по формулам [43]:

$$\left. \begin{aligned} x' &= \Delta x \left(1 - \frac{H_0}{N_0} \right) \cos \gamma - \Delta y \left(1 - \frac{H_0}{N_0} \right) \sin \gamma \\ y' &= \Delta y \left(1 - \frac{H_0}{N_0} \right) \cos \gamma - \Delta x \left(1 - \frac{H_0}{N_0} \right) \sin \gamma \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

где $\Delta x = x - x_0$; $\Delta y = y - y_0$; x_0 и y_0 — прямоугольные координаты начального пункта в местной системе координат; x и y — те же координаты любого пункта (кроме начального); γ — угол разворота координатных осей двух систем.

Если на картографируемой территории все измерения в местной системе отнесены к уровню Балтийского моря, то значение

$\frac{H_0}{N_0}$ принимается равным 0.

Контролем вычислений по преобразованию координат из местной системы в государственную (СК-95) служат равенство длин сторон, полученных из решения обратных задач по координатам обеих координатных систем. Допустимая разность контрольных значений сторон равна 0,01 м [43].

По результатам преобразования координат заполняется справка по образцу, приведенному в [43, прил. 21].

ГЛАВА 3. СИСТЕМЫ ВЫСОТ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГЕОГРАФИЧЕСКОМ, ГЕОДЕЗИЧЕСКОМ И КАРТОГРАФИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ЗЕМЛИ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Высотой в геодезии называют вертикальное расстояние от точки физической Земли до исходной поверхности. По геометрическому смыслу высота является третьей координатой в дополнение к плановым (плоскостным) координатам X и Y . Знание высоты необходимо для характеристики рельефа картографируемых территорий, а в строительстве роль высоты трудно переоценить. На топографических картах и топографических планах высоты характерных точек рельефа показываются отметками — численными значениями высот.

В зависимости от вида исходной (отсчетной) поверхности различают следующие системы высот: ортометрическую, нормальную, геодезическую, динамическую, условную [10, 19, 21, 50].

§ 2. ОРТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВЫСОТ

В ортометрической системе высотой является расстояние по отвесной линии от точки физической поверхности Земли до поверхности геоида. Как указано выше (глава 1 § 1), геоидом называют фигуру (тело), ограниченное уровневой поверхностью, проведенной через нуль Кронштадтского футштока. Последний представляет собой медную измерительную рейку, закрепленную на устое одного из мостов г. Кронштадта таким образом, чтобы нуль футштока находился на среднем уровне поверхности воды Балтийского моря. Такую систему высот стали называть Балтийской.

До 1942 г. наряду с Балтийской применялись Черноморская и Тихоокеанская системы высот, в которых за отсчетные были приняты поверхности геоидов, проведенные соответственно по сред-

нему уровню поверхности воды в Черном море и Тихом океане в акватории Охотского моря.

Ортометрические высоты определяются по результатам геометрического (при помощи нивелиров) и тригонометрического (при помощи теодолитов) нивелирования. При этом основным являлось геометрическое нивелирование I и II-го классов. В бывшем СССР протяженность сети геометрического нивелирования к 1942 г. составляла около 400 тыс. км. Оказалось, что уровень Черного моря отличается от уровня Балтийского моря на 0,60 м, а Тихого океана — на 1,00 м [18, 52, 53].

В связи с переходом к эллипсоиду Красовского с 1942 г. при обработке результатов плановых геодезических сетей было принято решение и об установлении единой системы высот. За исходный пункт, единый для всей территории СССР и ряда европейских стран, был принят нулевой штрих Кронштадтского футштока. Такая система получила название Балтийской системы высот 1942 г.

§ 3. СИСТЕМА НОРМАЛЬНЫХ ВЫСОТ

Из физики известно, что уровенные (эквипотенциальные) поверхности, проходящие на разных высотах, должны быть параллельны [18, 54]. Это условие не выполняется вследствие влияния центробежной силы, обусловленной суточным вращением Земли, и неравномерным распределением масс внутри Земли. По этим причинам отвесные линии, совпадающие с направлением нити отвеса, занимают положение в трехмерном пространстве, неподдающееся математическому описанию. Запуски ИСЗ и решение других задач потребовали замены геоида на другую модель Земли, математически определяемую относительно физической поверхности Земли и поверхности отсчетного эллипсоида (общеземного или референсного). Возникла проблема изучения гравиметрического поля Земли — определения потенциала силы тяжести в точках, равномерно расположенных по всей земной поверхности [18, 21, 30].

Методы изучения внешнего гравитационного поля Земли, разработанные русскими учеными под руководством М. С. Молоден-

ского, описаны в работе [30]. Предложено равномерное (нормальное) распределение земных масс, подчиняющееся определенному математическому закону. Наряду с нивелировками I и 2-го классов ЦНИИГА и К и ВТУ в период с 1946 по 1976 г. выполнен большой объем работ по изучению гравитационного поля Земли. Так как в 1976 г. для обработки результатов спутниковых наблюдений системы «Транзит» был введен общеземной эллипсоид, потребовалось связать нормаль к эллипсоиду, проведенную через точку физической поверхности Земли (см. рис. 4), с отвесной линией. Последняя является основной ориентирующей линией при производстве инструментальных геодезических наблюдений. Напомним, что отвесная линия перпендикулярна к поверхности геоида.

На основании теории М. С. Молоденского о нормальном распределении масс внутри Земли, позволяющей вычислять нормальное ускорение силы тяжести γ , предложено вводить поправки в результаты геометрического нивелирования I и II-го классов, а в горных районах и нивелирования III-го класса. Поправку δ_h в измеренное превышение h между реперами A и B вычисляют по формуле [19]:

$$\delta_h = \frac{1}{\gamma_m}(\gamma_A - \gamma_B)H_m + \frac{h}{\gamma_m}(g - \gamma)_m, \quad (23)$$

где γ_m — среднее значение нормальной (теоретической) силы тяжести в точках A и B соответственно γ_A и γ_B ; H_m — среднее значение из величин ортометрических высот H_A и H_B в точках A и B ; g — измеренное инструментально (при помощи гравиметров) ускорение силы тяжести; $(g - \gamma)_m$ — средняя аномалия силы тяжести.

Величина $(g - \gamma)_m$ определяется из выражения [19]:

$$(g - \gamma)_m = \frac{1}{2}[(g_A - \gamma_A) + (g_B - \gamma_B)]. \quad (24)$$

Высоты H , вычисленные по исправленным поправкам δ_h превышениям, получили название нормальных, а модель Земли, точки которой отстоят от физической поверхности Земли на величины нормальных высот, стали называть квазигеоидом (почти геоидом). В равнинных местах квазигеоид совпадает с геоидом, а в горной местности их несовпадение достигает нескольких метров [19, 21].

Систему нормальных высот принято называть Балтийской системой высот 1977 г. За начало ($H = 0$) принят нуль того же самого Кронштадтского футштока (см. главу 3 § 2).

§ 4. СИСТЕМА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ВЫСОТ

Как указано в пункте 3.3 § 3 главы 2, геодезическая высота H_G есть расстояние по нормали от точки физической поверхности Земли до поверхности отсчетного эллипсоида (см. рис. 4). Величина H_G определяется двумя способами.

В первом способе значение H_G равно сумме нормальной высоты H точки физической поверхности Земли и высоты квазигеоида ξ (см. рис. 4) и вычисляется по формуле (4).

Величина H определяется из геометрического нивелирования при помощи высокоточных и точных нивелиров с введением поправок за аномалию силы тяжести (см. § 3 данной главы). Высота квазигеоида — расстояние по нормали 4 (см. рис. 4), заключенное между квазигеоидом и отсчетным эллипсоидом. Значение ξ определяется из астрономо-геодезических и гравиметрических приборов и гравиметров на точке (пункте) земной поверхности [21, 30, 31, 41].

Во втором способе величина H_G вычисляется по геоцентрическим прямоугольным пространственным координатам точки земной поверхности, определенным из спутниковых наблюдений при помощи спутниковых приемников по методике, описанной в главе 2 пункте 3.3 §3. При этом используется программный пакет для ЭВМ «Геомастер» [41].

В заключение отметим, что различают абсолютные и относительные геодезические высоты, абсолютные и относительные высоты квазигеоида, абсолютные и относительные уклоны отвесных линий от нормалей к отсчетному эллипсоиду [41]. Абсолютные значения названных величин связаны с общеземными эллипсоидами, а их относительные значения — с референсными эллипсоидами.

Напомним, что общеземными эллипсоидами являются эллипсоид ПЗ-90, принятый в России с 1990 г. и эллипсоид WGS-84, введенный в США в 1984 г. Первый используется при обработке результатов наблюдений спутников системы ГЛОНАСС, а второй — GPS. Референсными эллипсоидами, позволяющими учитывать географическое положение отдельных и групп государств с точки зрения уменьшения искажений при проектировании поверхности эллипсоида на плоскость, служат: эллипсоид Красовского для России и стран СНГ, эллипсоид Кларка — для США и ряда латиноамериканских стран.

§ 5. ДИНАМИЧЕСКИЕ ВЫСОТЫ

Согласно теории М. С. Молоденского о внешнем гравитационном поле Земли, нормальное ускорение силы тяжести является функцией географической широты и абсолютной высоты точки наблюдений [30].

При строительстве и эксплуатации уникальных сооружений (ускорителей частиц, АЭС, ГЭС и др.) наиважнейшее значение имеет внутреннее метрическое единство. То есть все геометрические параметры (длины линий и высоты) должны определяться по строго линейному математическому закону относительно принятого начала координат.

На строительных площадках вышеназванных сооружений выбирают начальный пункт, определяют его нормальную высоту и принимают урвенную поверхность, проходящую через него, постоянной для всей площадки. То есть высоты пунктов строитель-

ной сетки строительной площадки не зависят от географической широты расположения самих пунктов.

Высоты точек, лежащих на обособленных площадках, определенные для средней географической широты, принято называть динамическими³.

§ 6. УСЛОВНЫЕ ВЫСОТЫ

Условная высота точки (пункта) есть динамическая высота, отсчитанная от условного начала. Так, при проектировании и строительстве отдельного здания за начало счета условных высот принимают уровень пола 1-го этажа ($H = 0$). Точки, расположенные выше нулевой отметки, имеют положительные значения, ниже ее — отрицательные. Условные высоты привязаны к отвесным линиям [25, 28].

³ Кузьмин, Б. С. Топографо-геодезические термины : справочник / Б. С. Кузьмин [и др.]. — М. : Недра, 1989. — 262 с.

ГЛАВА 4. ЗВЕЗДНЫЕ (НЕБЕСНЫЕ) СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ЭФЕМЕРИД СПУТНИКОВ

§ 1. ИСТИННАЯ (ИНЕРЦИАЛЬНАЯ) СИСТЕМА НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ

Чтобы решить задачу обеспечения передаточного блока ИСЗ в спутниковых системах ГЛОНАСС, GPS, DORIS и др. эфемеридами, необходима инерциальная система координат. По определению инерциальная система должна быть стационарной (неподвижной) в космическом (небесном) пространстве или равномерно движущейся с постоянной скоростью [1, 2, 4, 5, 12, 20, 24, 26, 27, 44, 46, 57].

Положение спутника A в системе небесных координат может быть задано либо сферическими координатами — прямым восхождением α и экваториальным склонением δ (рис. 7), либо пространственными прямоугольными координатами X, Y, Z .

Используемая в геодезической практике при производстве и обработке результатов спутниковых наблюдений инерциальная система координат задается следующим образом [1, 5, 9, 13, 26, 38, 57]:

- начало находится в центре O масс Земли (рис. 7);
- ось Z пространственных прямоугольных координат направлена по мгновенной оси PP' вращения Земли к истинному Северному полюсу Земли;
- оси X и Y пространственных прямоугольных координат лежат в плоскости истинного небесного экватора, перпендикулярной к оси Z ;
- ось X направлена к истинной точке весеннего равноденствия γ (точке пересечения плоскости истинного небесного экватора с эклипстикой — проекцией орбиты Земли на небесную сферу при ее годичном обращении вокруг Солнца), плоскость эклиптики $E\gamma E'O$ наклонена к плоскости небесного экватора $Q\gamma Q'O$ на угол $\varepsilon = 23^\circ 27'$ (рис. 7);

- ось Y дополняет систему координат пространственных прямоугольных координат до правой (ось Y расположена правее оси X , если смотреть с острия вектора OX).

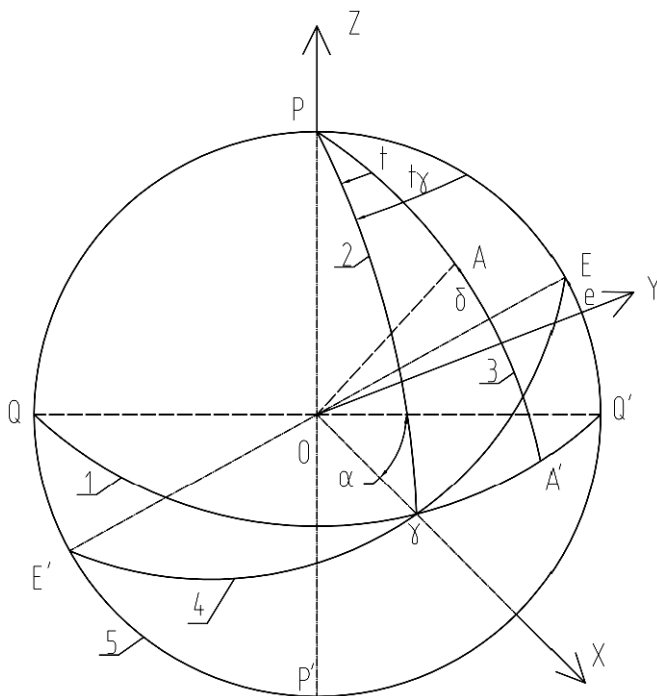


Рис. 7. Истинная небесная система координат: 4 — эклиптика; 5 — астрономический меридиан Гринвича; t — часовой угол спутника A ; t_γ — часовой угол точки весеннего равноденствия γ (всемирное время); A' — проекция небесного тела A на плоскость небесного экватора 1

Итак, отсчетными плоскостями в истинной системе небесных координат являются: плоскость небесного экватора 1, проведенная через центр масс Земли O перпендикулярно мгновенной оси вращения Земли PP' ; плоскость начального круга склонений 2, про-

веденная через точку γ перпендикулярно плоскости небесного экватора (рис. 7).

Положение спутника A на эпоху T задается двумя сферическими координатами: прямым восхождением α и склонением δ , величины α и δ выражают в градусной мере.

α — это угол в плоскости небесного экватора, отсчитанный от начального круга склонений до круга склонений Z небесного (космического) объекта A . Величину α отсчитывают против хода часовой стрелки от 0° до 360° .

δ — это угол в плоскости круга склонений Z спутника A , отсчитанный от плоскости экватора 1 до вектора OA , соединяющего центр небесной сферы O и космический объект A . Величину δ отсчитывают в обе стороны от небесного экватора в пределах от 0° до 90° .

Под объектом A , иначе небесным телом, будем понимать спутник любого назначения (в т. ч. спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, DORIS, Галилео), звезды от 1 до 9-й величины, галактические и внегалактические объекты, включая квазары.

Прямое восхождение может быть задано и в часовой мере, что и делается в астрономических ежегодниках (российских, американских, европейских, а в последнее время и международных) для обеспечения необходимыми данными действующие системы земных и небесных координат [1, 3, 5, 12, 38, 57, 58].

Инерциальные геоцентрические прямоугольные координаты X , Y , Z небесного тела A в небесной сферической системе α и δ задаются формулами [38]:

$$X = r \cdot \cos \alpha \cdot \cos \delta ; Y = r \cdot \sin \alpha \cdot \cos \delta ; Z = r \cdot \sin \delta , \quad (25)$$

где α — прямое восхождение;

δ — склонение наблюдаемого космического объекта;

r — радиус небесной сферы.

Обратное преобразование осуществляется по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \operatorname{arctg} \frac{Y}{X} \quad (0 \leq \alpha \leq 360^\circ - 24^h; 1 \text{ час} = 15^\circ); \\ \delta &= \operatorname{arc} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ); \\ r &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Здесь α — прямое восхождение небесного тела на эпоху T , а δ — склонение его, r — радиус-вектор, выражающий расстояние от центра сферы до объекта A .

Инерциальные системы координат закрепляются каталогами координат звезд. Взамен международного каталога FK4 (1964 г.) в настоящее время используются фундаментальные каталоги FK5 и FK6, в которых учтены, кроме прецессии и нутации Северного полюса Земли, и собственные движения звезд. FK расшифровывается по-английски как Fundamental Katalog [1].

FK5 составлен на уточненных положениях 1535-ти звезд, которые входили в FK4, и отнесен международным астрономическим союзом к эпохе 2000 г. (эпохе среднего условного полюса Земли — УПЗ 2000) [1, 2].

В Европе для реализации (закрепления в космическом пространстве) системы координат IERS в 1989 г. был запущен астрономический спутник Hipparcos (Гиппаркос), по результатам наблюдений которого составлен каталог Hipparcos, включающий экваториальные координаты (α и δ) 118 218 звезд на эпоху 1991 г.

FK6 объединяет FK4, FK5 и каталог Гиппаркос. FK6 отнесен к эпохе 2003 г. [1, 12, 33, 44].

Итак, инерциальная система координат (истинная звездная — небесная) должна иметь начало в центре масс Земли (быть геоцентрической) и иметь две ориентировки в космическом пространстве. Ось Z этой системы должна быть направлена из начала координат к Северному условному полюсу Земли, или, как вариант, к мгновенному полюсу ее, а ось X должна проходить через точку весеннего равноденствия. Эта система является сферической (начало коор-

динат помещено в центре небесной сферы заданного радиуса r). Координаты ее могут задаваться в двух формах: пространственными прямоугольными X, Y, Z , выраженными в метрической мере; сферическими α и δ , определяемыми в градусной мере. Прямое восхождение α может выражаться и в часовой мере, например, при составлении фундаментальных каталогов и астрономических ежегодников [2].

При определении мгновенных (истинных) координат в инерциальной системе учитывают три основных фактора: изменение положения в пространстве Северного полюса Земли — уклонение его от УЗП; собственные движения звезд; динамику центра масс Земли.

Изменение положения в пространстве Северного полюса Земли, происходящего из-за постоянно изменяющегося гравитационного притяжения Земли Солнцем, Луной и планетами, учитывают введением поправок в небесные координаты за прецессию и нутацию.

Из-за прецессии Северный полюс Земли описывает в пространстве относительно условного полюса Земли окружность за период около 25 700 лет. Положение УЗП устанавливается на фундаментальную эпоху T_o , например, на начало Юлианского года — J2000.0 и закрепляется небесными координатами α_{T_o} и δ_{T_o} звезд и внегалактических объектов радиоизлучения. Величины α_{T_o} и δ_{T_o} приводятся в фундаментальных каталогах и астрономических ежегодниках [1, 12, 38]. УЗП называют и Международным условным началом (МУН) [1, 12].

Кроме вековых периодических движений Северного полюса Земли, из-за прецессии ось вращения Земли совершает сравнительно небольшие периодические колебания (период около 18,6 года) относительно окружности прецессии и малые краткопериодические движения (период около 35 земных суток). Названные небольшие и малые периодические движения Северного полюса Земли называют нутацией [1, 38].

Собственные движения звезд (включая Солнце) учитываются при определении небесных координат космических объектов по специальной методике [30, 31].

Движение центра масс Земли в пространстве происходит, в основном, из-за следующих причин⁴:

- изменения уровня морей;
- изменений в ледяных щитах (Антарктида, Гренландия, Индо-Иранская и Памирская ледяные гряды);
- тектонических смещений в земной коре (извержения вулканов, движения литосферных плит, постледниковые пучения).

Установлено, что в среднем годовое смещение в положении центра масс Земли относительно принятой за инерциальную систему ICRS — международную небесную отсчетную систему (International Celestial Reference System) составляет [1]: по 4 мм по координатам X и Y и порядка 10 мм — по Z . Учитывать эти периодические смещения центра масс Земли, не превышающие в среднем 10 мм, не рекомендовано, так как они находятся в пределах точности спутниковых определений небесных и земных координат [1].

§ 2. КРУГИ И ПЛОСКОСТИ НЕБЕСНОЙ СФЕРЫ

Дадим определения основных кругов и плоскостей небесной сферы. При решении многих задач геодезической астрономии, математической картографии, навигации и других дисциплин удобно рассматривать не действительные положения каких-либо объектов (космических тел и точек земной поверхности), а их проекции на небесную сферу.

В общем случае центр небесной сферы может находиться в любой точке пространства: в центре масс Земли, в любой точке физической поверхности Земли, в центре масс Луны, Солнца, планет, в центре масс Солнечной системы. В зависимости от положения центра небесной сферы будем иметь следующие небесные сферы: геоцентрическую, топоцентрическую, селеноцентрическую, гелио-

⁴ Морозов, В. П. Курс сфероидической геодезии : учебник. — М. : Недра, 1979. — 476 с.

центрическую, ареоцентрическую (центр сферы находится в центре масс Марса), барицентрическую (центр сферы находится около Солнца — в центре масс Солнечной системы) [38].

Радиусу небесной сферы могут придаваться различные значения. Он может иметь произвольное значение r (радиус-вектор в выражениях (25) и (26)), среднему радиусу Земли или Луны. При теоретических исследованиях часто принимают радиус небесной сферы равным единице.

Поместим центр небесной сферы в точку M физической поверхности Земли (рис. 8) и уберем для простоты изложения координатные оси X, Y, Z , а также ограничимся показом основных полукругов, кроме небесного (астрономического) меридиана и небесного (астрономического) горизонта.

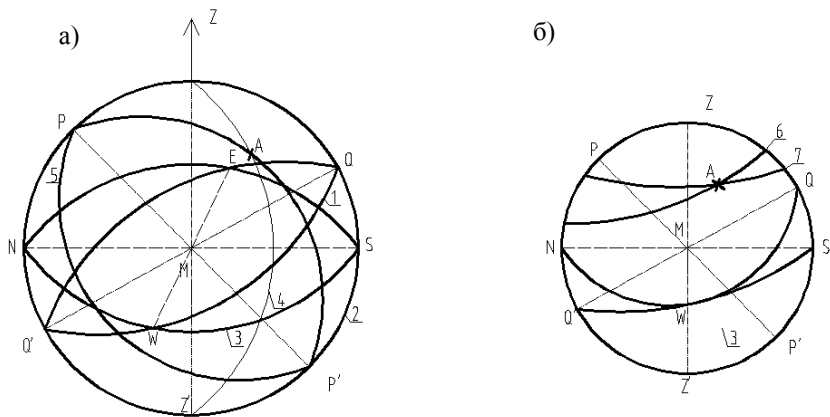


Рис. 8. Основные линии, круги и плоскости небесной сферы:

- 1 — небесный экватор; 2 — небесный меридиан; 3 — небесный горизонт;
- 4 — вертикаль (полукруг высот); 5 — начальный (Гринвичский) меридиан;
- 6 — параллель; 7 — альмукантарат; PP' — ось мира;
- ZZ' — проекция отвесной линии точки M на небесную сферу

Основной в любой небесной сфере является линия PP' , проходящая через центр сферы (в нашем случае точку местности M) па-

параллельно оси вращения Земли. По отношению к небесной сфере ось вращения Земли или параллельную ей линию принято называть осью мира.

Небесным экватором называется плоскость, проходящая через центр небесной сферы перпендикулярно оси мира. Небесный экватор параллелен земному экватору.

Следующей по своему значению является отвесная линия ZZ' , совпадающая с нитью отвеса на точке M местности. Точка Z пересечения отвесной линии с поверхностью сферы вблизи точки P (Северного полюса) называется зенитом, а противоположная ей точка Z' — надиром. Все четыре точки P , P' (Северный и Южный полюса мира) и Z и Z' (зенит и надир), отнесенные к конкретной точке наблюдений земной поверхности, лежат в плоскости небесного, иначе астрономического, меридиана 2 точки M (рис. 8).

Плоскость небесного (астрономического) горизонта точки M земной поверхности называют плоскость, перпендикулярную отвесной линии ZZ' . Она идентифицируется касательной к пузырьку цилиндрического уровня астрономического и геодезического прибора, установленного на заданной точке земной поверхности (в нашем случае точке M). По высоте плоскость небесного горизонта фиксируется отметкой H . Последняя определяется как вертикальное расстояние от начальной (исходной) уровенной поверхности до точки физической поверхности Земли в Балтийской системе высот. В России за исходную принята уровенная поверхность, проходящая через нуль Кронштадтского футштока, установленного на устье Синего моста через обводной канал в г. Кронштадте.

Плоскости, проведенные параллельно небесному экватору и небесному горизонту, образуют в пересечении с поверхностью небесной сферы окружности малых кругов — соответственно параллели и альмукантараты (рис. 8).

Теперь назовем координатообразующие круги для небесных тел, непосредственно связанные с небесным экватором и небесным горизонтом: круг склонений и круг высот.

Кругом склонений называют большой круг небесной сферы, проходящий через ось мира и небесное тело (не путать с точками поверхности Земли). На рисунке 8 показан полукруг PAP' круга склонений небесного тела A .

Кругом высот называют большой круг небесной сферы, проходящий через отвесную линию и небесное тело. Полукруг высот принято называть вертикалом. Вертикал, проведенный перпендикулярно небесному меридиану точки M , называется первым вертикалом. Понятие первого вертикала введено картографами и широко используется при описании моделей фигуры Земли.

Опишем наименования точек пересечения больших кругов небесной сферы, так называемые геометрические полюсы.

Небесный меридиан, отнесенный к точке земной поверхности, пересекается с небесным экватором в точках Q и Q' . Точку Q принято называть верхней точкой небесного экватора (расположена ближе к зениту Z), а точку Q' — нижней точкой небесного экватора (расположена ближе к надиру Z' (см. рис. 8)).

Небесный меридиан в пересечении с небесным горизонтом образует полуденную линию NS . Точку N называют точкой севера небесного горизонта (расположена ближе к Северному полюсу P), а точку S — точкой юга небесного горизонта (расположена ближе к Южному полюсу P').

Небесный экватор в пересечении с небесным горизонтом дает точку запада W (расположена влево от полуденной линии NS , если смотреть на точку севера N) и точку востока E (расположена вправо от NS).

Итак, основными отсчетными плоскостями и соответствующими им большими кругами небесной сферы являются:

- небесный экватор, жестко связанный с осью мира, которая совпадает с осью вращения Земли или параллельна ей. Полюса мира P и P' являются геометрическими полюсами по отношению к небесному экватору, совпадающему с земным экватором или параллельному ему;

- небесный горизонт, жестко связанный с отвесной линией на конкретной физической точке земной поверхности. Плоскость горизонта задается касательной к пузырьку цилиндрического уровня астрономического или геодезического прибора, установленного на точке земной поверхности. Геометрическими полюсами небесного горизонта служат зенит Z и надир Z' ;

- небесный меридиан, жестко связанный с обеими основными линиями: отвесной линией на заданной точке местности и осью мира. Геометрическими полюсами небесного меридиана являются точка запада W и точка востока E ;

- первый вертикал — круг высот, перпендикулярный небесному меридиану. Геометрическими полюсами первого вертикала служат точка севера N и точка юга S , лежащая в плоскости небесного горизонта.

Круг склонений, проходящий через ось мира и небесное тело, часто называют часовым кругом. PAP' — часовой полукруг (см. рис. 8).

При решении задач, связанных с звездными координатными системами, рассматривают лишь половинки больших кругов, хотя в документах принято применять термины полных кругов: небесный меридиан, вертикал, круг склонений (часовой круг). Исключения составляют **небесный экватор**, **небесный горизонт** и **эклиптика**.

В практической астрономии за центр небесной сферы часто принимают центр шара с радиусом $r = 6371$ км (средний радиус земного шара), совпадающий с центром масс Земли, лежащей на оси вращения Земли или на линии, ей параллельной. В этом случае точки физической поверхности Земли проектируют на поверхность земного шара радиусами-векторами из центра сферы O (см. рис. 8). Напомним, применительно к небесной сфере линию, проведенную через центр небесной сферы, совпадающую или параллельную оси вращения Земли, называют осью мира [26, 27, 34].

В 1-й экваториальной системе небесных координат, при определении астрономических широт и долгот точек земной поверхности и счете всемирного времени, используют полукруг небесного

меридиана, проведенного через центр A Гринвичской обсерватории, расположенной вблизи Лондона (полукруг 5 на рис. 8). Этот меридиан, проходящий через ось мира (по определению) и главную точку Гринвича, принято называть Гринвичским меридианом, или сокращенно Гринвичем. Лондонскую ветвь Гринвича принимают за начальную плоскость при счете астрономических долгот и часовых углов [38].

Во 2-й экваториальной и эклиптической системах звездных координат небесных тел за начальную точку отсчета принимают точку пересечения небесного экватора 1 и круга эклиптики 4 (см. рис. 7). Окружность круга эклиптики называют сокращенно эклипстикой, а плоскость, совпадающую с кругом эклиптики, — плоскостью эклиптики. Плоскость эклиптики наклонена к плоскости небесного экватора на угол $\varepsilon = 23^{\circ}27'$. **Виртуальную (воображаемую) линию, проведенную через центр небесной сферы перпендикулярно плоскости эклиптики, называют осью эклиптики.** Полюсами эклиптики считают точки пересечения оси эклиптики с небесной сферой. На рисунке 7 показан Северный полюс эклиптики — точка R ; Южный полюс эклиптики — точка R' , расположенная вблизи Южного полюса мира — точки P' (на рисунке 7 не изображена, чтобы не загромождать рисунок).

§ 3. ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ

В практической астрономии используют так называемую вторую экваториальную систему небесных координат, а в космической геодезии — первую экваториальную систему [5, 9, 38].

Вторая экваториальная система небесных координат не участвует в суточном вращении Земли (в отличие от земных систем координат), так как одна из начальных (исходных) плоскостей проходит через точку весеннего равноденствия.

Положение звезды A во второй экваториальной системе координат задается прямым восхождением α и склонением δ (см. главу 4 § 1). То есть здесь реализуется сферическая форма истин-

ной небесной координатной системы, в которой за исходные отсчетные плоскости приняты: плоскость мгновенного среднего круга склонений, проходящего через точку весеннего равноденствия; плоскость небесного экватора.

В зависимости от того, к каким положениям точки весеннего равноденствия и небесного экватора (оси вращения Земли) отнесена используемая в практике система небесных координат, различают [1, 12, 38]:

- мгновенную вторую экваториальную небесную координатную систему (α и δ), определяемую истинной точкой весеннего равноденствия и истинной осью вращения Земли (мгновенным небесным экватором) на эпоху t реального времени;
- среднюю вторую экваториальную небесную координатную систему (α_T и δ_T) на среднюю эпоху T , например, на эпоху T2000, определяемую средней точкой весеннего равноденствия γ_T , средним небесным экватором и средним (условным) земным полюсом — УЗП [12, 38].

Вторая экваториальная система небесных координат закрепляется координатами на определенную эпоху T , публикуемыми в астрономических ежегодниках. Переход от фактических (мгновенных, измеренных на эпоху t), координат космических объектов осуществляется по специальной методике [1, 12, 38, 55].

Заметим, что мгновенная вторая экваториальная система координат, связанная с направлением оси вращения Земли, положение которой в пространстве меняется под влиянием прецессии и нутации, не является инерциальной (постоянной в космическом пространстве).

А координаты звезд, вычисленные на определенную (среднюю) эпоху T , изменяются только по причине собственного движения звезд. Эти движения учитываются введением поправок в координаты, выписанные из астрономических ежегодников и фундаментальных каталогов [2].

Первая экваториальная система координат, по сути, не является небесной, так как связана с суточным вращением Земли. В ней за начальную отсчетную плоскость принята плоскость среднего

Гринвичского круга склонений, параллельная плоскости мгновенного круга склонений Гринвича на эпоху T .

Сферическими координатами в первой экваториальной системе, используемой в астрономии и космической геодезии (например, при дистанционном зондировании земной поверхности со спутников специального назначения для картографирования и других целей), являются [5, 14, 38] (рис. 9):

- гринвичский часовой угол t — сферический угол, отсчитываемый в часовой мере от 0 до 24 часов по ходу часовой стрелки от среднего Гринвичского круга склонений до круга склонений небесного тела A ;
- склонение δ , отсчитанное от плоскости небесного экватора по дуге склонений 4 точки A от 0° до 90° в обе стороны от небесного экватора (точки A') небесной сферы радиуса r .

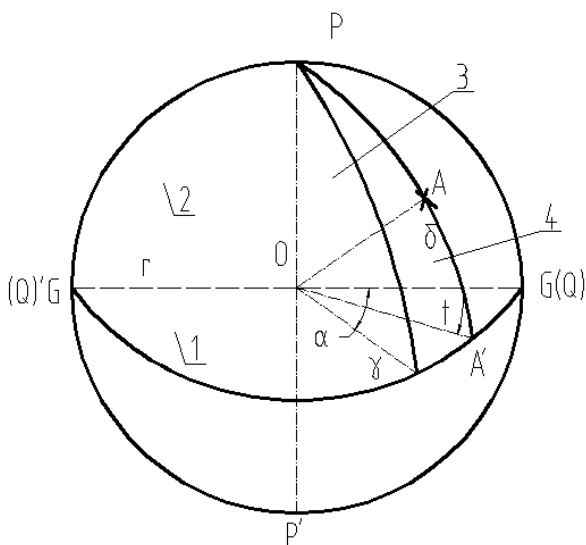


Рис. 9. Первая (Гринвичская) экваториальная система координат:

- 1 — плоскость небесного экватора; 2 — плоскость начального (Гринвичского) меридиана; 3 — плоскость круга склонений точки весеннего равноденствия γ ; 4 — плоскость круга склонений небесного тела A

§ 4. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ

В астрономических наблюдениях звезд (в простейшем случае, при определении истинного азимута, заданного на земной поверхности направления по Солнцу) используются горизонтальные системы небесных координат. Такие системы по определению являются топоцентрическими: начало координат их отнесено к точкам наблюдений на земной поверхности. Сколько точек наблюдений, столько и топоцентрических систем.

Поместим центр небесной сферы в точку наблюдений земной поверхности M (рис. 10) и проведем в плоскости астрономического меридиана 1 ось мира PP' , параллельную оси вращения Земли, и отвесную линию ZZ' , перпендикулярную касательной цилиндрического уровня астрономо-геодезического прибора (см. главу 4 § 2).

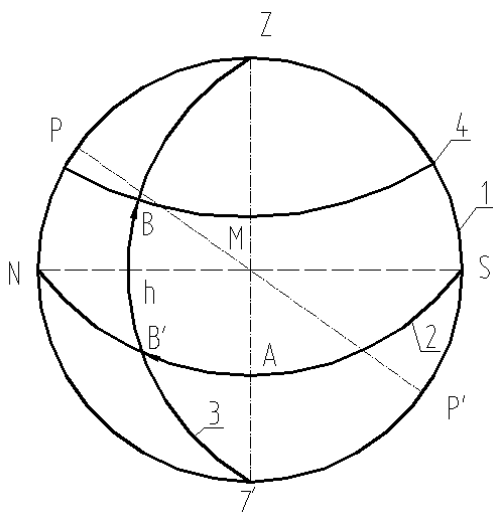


Рис. 10. Горизонтальная система небесных координат, отнесенная к точке M земной поверхности: 1 — астрономический (небесный) меридиан точки M ; 2 — небесный горизонт; 3 — полукруг вертикала (полукруг высот) небесного тела B ; PP' — ось мира; ZZ' — отвесная линия точки M ; 4 — альмукантарат точки B

Тогда положение наблюдаемого в эпоху t небесного тела B можно задать двумя сферическими координатами: астрономическим азимутом A и зенитным расстоянием z (или высотой h).

Величину A отсчитывают по дуге небесного горизонта 2 (рис. 10) по ходу часовой стрелки от точки юга S до полукруга высот 3 небесного тела B в диапазоне $0^\circ - 360^\circ$.

z — дуга полукруга высот 3, отсчитанная от точки зенита Z до малого круга 4 (альмукуантарата небесного тела B), параллельного небесному горизонту 2. Величина z в южном полушарии отсчитывается от точки надира Z' . Значения z охватывают диапазоны от 0° до 90° и от -0° до -90° .

Высотами h небесных тел принято в астрономии называть величины, вычисляемые по формуле [38]:

$$h = 90^\circ - z, \quad (27)$$

где z — зенитное расстояние небесного тела.

§ 5. ОРБИТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

Орбитальная система координат, используемая для определения положения отдельного спутника Земли (в частности, ИСЗ спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS и DORIS), связана с плоскостью орбиты спутника. И, как любая небесная система координат, она привязана к плоскости небесного экватора.

Положение спутника в заданной системе координат и времени задается его эфемеридами. Под эфемеридами спутника будем понимать его геоцентрические прямоугольные координаты X_s, Y_s, Z_s в системах ПЗ-90 и ПЗ-90.11 для спутников ГЛОНАСС и WGS-84 — спутников GPS, определенные на эпоху t . В эфемериды также входят поправки часов спутников на эпоху передачи или сигналов и скорости изменения параметров их орбит.

Теоретической основой для вычисления эфемерид спутника служит задача движения двух тел. При этом траекторию спутника (линию орбиты) формируют три силы: гравитационные, инерцион-

ные и сила бортовых двигателей. Первые две силы вызывают свободный полет спутника, третья — позволяет осуществлять маневрирование (корректировку орбит) спутника в пространстве.

Рассмотрим параметры орбиты спутника в инерциальной системе координат с началом координат O , совпадающим с центром масс Земли. Оси пространственных прямоугольных координат OX , OY , OZ образуют правую систему координат (см. главу 4 § 1). При этом ось OX , лежащая в плоскости небесного экватора, направлена в точку весеннего равноденствия, а ось OZ , совпадающая с осью вращения Земли, имеет северную ориентировку [1] (рис. 11).

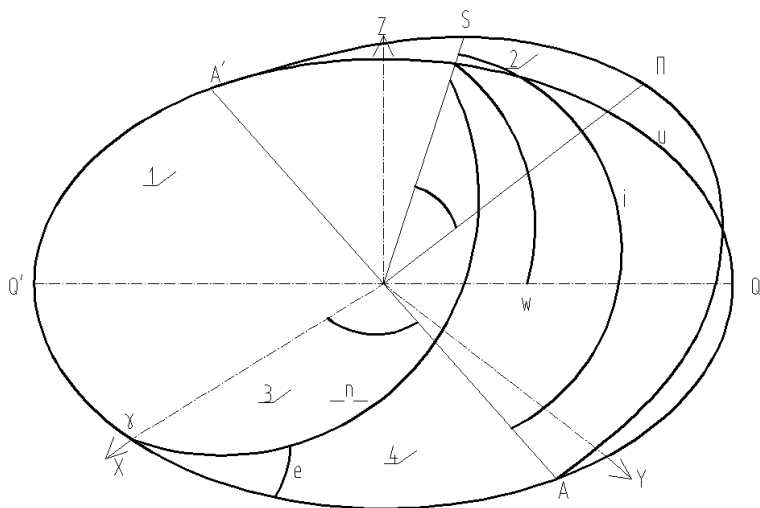


Рис. 11. Параметры орбиты спутника в инерциальной системе геоцентрических пространственных прямоугольных координат: 1 — плоскость небесного экватора, перпендикулярная оси вращения Земли OZ ; 2 — плоскость орбиты спутника; 3 — плоскость орбиты Земли (эклиптики); 4 — эклиптика; γ — точка весеннего равноденствия (точка пересечения небесного экватора с эклиптикой); AA' — линия узлов орбиты спутника (линия пересечения плоскостей 1 и 2); π — перигей орбиты спутника (точка наименьшего удаления спутника от Земли); ϵ — угол наклона плоскости орбиты Земли к плоскости небесного экватора

Кроме основных параметров орбиты спутника (большой полуоси a и эксцентриситета e орбитального эллипса, весьма близкого к окружности), определяют следующие элементы ориентирования орбиты спутника в пространстве: долготу восходящего узла орбиты Ω и элементы перигея (углы ω и i) в орбитальной системе координат $AOA'\pi$, привязанной к геоцентрической системе координат $XOYZ$ (через точку γ) (см. рис. 11).

Ω — долготой восходящего узла A орбиты спутника называют угол, отсчитанный в плоскости небесного экватора от оси X (направления на точку весеннего равноденствия) до направления на восходящий узел A орбиты спутника против хода часовой стрелки в пределах от 0° до 360° .

ω — аргументом перигея орбиты спутника считают угол в плоскости орбиты спутника, отсчитанный от направления на восходящий узел A орбиты спутника до направления на перигей π орбиты спутника. Величина ω отсчитывается по направлению движения спутника в пределах от 0° до 360° .

i — наклонение (второй угол, связанный с перигеем орбиты спутника (элемент перигея)) есть угол наклона плоскости орбиты спутника к плоскости небесного экватора (см. рис. 11). Величина i может принимать значения от 0° до 180° . Орбиты спутников с наклонением $i=0^\circ$ или $i=180^\circ$ принято называть экваториальными (лежат в плоскости небесного экватора), а с наклонением $i=90^\circ$ — полярными. Орбиты спутника с наклонением $0^\circ < i < 90^\circ$ называют орбитами с прямым движением спутника, а — с $90^\circ < i < 180^\circ$ с обратным движением спутника по отношению к направлению вращения Земли.

Итак, параметрами орбиты отдельного спутника (величинами Ω , ω и i) определяется положение орбиты спутника S в космическом пространстве, например, относительно осей 2-й экваториальной. Координатами спутника S , движущегося по своей орбите вокруг Земли, в орбитальной системе координат (определяемой для каждого спутника) являются: истинная аномалия u спутника S — угол в плоскости орбиты спутника, отсчитанный от направления на

перигей до направления на спутник (см. рис. 11); t_π — момент (эпоха) прохождения спутником перигея π в принятой системе отсчета времени [38].

В практике часто вместо угла v используют аргумент приведенной широты u , равный:

$$u = \omega + v. \quad (28)$$

При передаче значений эфемерид в режимах альманаха и бортовых эфемерид (см. ниже) вместо истинной аномалии v спутника используют среднюю аномалию M [1]. Суть задачи состоит в том, что подчиняясь законам Кеплера, спутник движется по своей эллиптической орбите (хотя и весьма близкой к окружности) неравномерно: ускоряя ход вблизи перигея и замедляя его около апогея.

При вычислении средней аномалии M берут направление на вертикальное (фиктивное) положение спутника, равномерно движущегося по своей орбите: направление на перигей π остается при этом фиксированным в пространстве.

Кратко остановимся на вопросе обеспечения эфемеридами спутников ГЛОНАСС и GPS. Эфемериды спутников, содержащие сведения о координатах и поправках к часам спутника, доступны потребителям в трех формах: данные альманаха, бортовые эфемериды, точные эфемериды. Имеются различия и в представлении эфемерид в системах ГЛОНАСС и GPS.

Существенны различия и в точности эфемерид, представляемых в трех видах. В среднем, абсолютная погрешность определения эфемерид составляет: в режиме альманаха — несколько километров; бортовых эфемерид — 2 м; точных эфемерид — от 5 см до 0,2 м [1].

Данные альманаха необходимы потребителю, работающему со спутниковым приемником, для поиска спутников, составления графиков видимости и планирования схем наблюдений спутников. Данные альманаха обновляются каждые шесть суток и транслируются как часть навигационного сообщения спутника. Сообщение альманаха содержит, в основном, параметры орбит (большую

полуось, эксцентриситет, долготу восходящего узла и ее дрейф за секунду, аргумент перигея, отклонение наклона орбиты от фиксированной величины (например, 54°), орбитальные координаты спутника, номер, текущую неделю GPS, опорную эпоху в текущую неделю, среднюю аномалию в опорную эпоху, поправку часов спутника и дрейф их) [1, 12].

Бортовые эфемериды, передаваемые по радио и засылаемые на спутники станциями Контрольных сегментов ГЛОНАСС и GPS ежесуточно, ретранслируются спутниками. Кроме данных, входящих в альманах, бортовые эфемериды включают в себя: скорость изменения наклона орбиты спутника, скорость изменения долготы восходящего узла из-за прецессии, три поправочных коэффициента (в аргумент перигея, в наклонение, в геоцентрическое расстояние). Бортовые эфемериды используются для вычисления опорных орбит спутников, обновления параметров орбит, прогноза (экстраполяции) орбит.

Как указывалось выше, бортовые эфемериды спутников ГЛОНАСС содержат и передают информацию в системе координат ПЗ-90, а спутники GPS — в системе WGS-84. Вся передаваемая спутником информация в виде вышеперечисленных параметров и прогнозов их изменения привязана к опорному моменту времени (эпохе). Точность определения координат спутников по бортовым эфемеридам составляет около 2,5 м [1, 10, 12, 41, 42-44].

Обеспечение точными эфемеридами и использование их в практических целях рассмотрим на примере спутниковой системы GPS, как более доступной для гражданского потребителя нашей планеты. ГЛОНАСС, разработанная с участием военных специалистов РФ, является менее доступной для широкого потребителя и поддерживается меньшим количеством производителей оборудования.

Точные эфемериды спутников GPS содержат координаты каждого спутника в системе координат WGS-84 и поправку к его часам. Эти данные, являющиеся продуктом постобработки результатов спутниковых наблюдений наземным вектором (сегментом)

управления и контроля службы GPS, передаются на каждый спутник на определенные эпохи t_a через интервалы 15 минут.

Передаваемые также с Земли угловые параметры положения спутника на его орбите выражаются в полуциклах орбит спутников (половинках орбит), а временные элементы орбит спутников отсчитываются от начального (Гринвичского) звездного времени в эпоху t_o — начало текущей недели координированного атомного времени до звездного времени в эпоху t_a (см. главу 5). Формулы поправок в принятые наземным потребителем значения параметров орбит спутников, наблюдаемых в эпоху t , приведены в работе [1]. Там же даны выражения для поправок в показания часов спутников и наземных спутниковых приемников.

Точные эфемериды (прогнозируемые координаты спутника, поправку к его часам и другие характеристики на эпохи t_α) предоставляются потребителям Международной геодезической службой (МГС) примерно через две недели после производства наблюдений с целью координирования наземных пунктов. Линейные элементы точных эфемерид имеют погрешность порядка 5 см и около 0,1 нс (1 нс равна 10^{-9} секунды) во времени.

В настоящее время можно получить и так называемые быстрые и ультрабыстрые эфемериды спутников GPS. Быстрые эфемериды могут быть предоставлены МГС на следующий день после спутниковых наблюдений, выполненных потребителем, обеспечивая следующую точность: среднюю погрешность в определении координат порядка 5 см, а во времени — около 0,2 нс. Ультрабыстрые эфемериды подаются МГС в эфир два раза в сутки. Точность ультрабыстрых эфемерид хуже точности быстрых эфемерид и составляет: погрешность в определении координат равна, в среднем, 25 см, а во времени — 5 нс [1].

Эфемериды (точные и быстрые) можно получить из сети Интернет с сайта МГС: www.igsb.jpl.nasa.gov. Точные эфемериды спутников GPS доступны в двух форматах: SP 3 и EF 18 [1, 39, 42-44, 48].

§ 6. МЕЖДУНАРОДНАЯ НЕБЕСНАЯ ОПОРНАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ — ICRS, ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ — ICRF

Как отмечено во Введении, освоение космического пространства поставило вопрос о создании международной опорной системы координат, не связанной с изменяющей свое положение в космическом пространстве, осью вращения Земли. Такая система была создана и получила аббревиатуру ICRS (расшифровка приведена во Введении).

Реализация инерциальной системы ICRS, являющейся истинной небесной системой небесных координат (см. главу 4 § 1), осуществлена посредством построения Международной опорной небесной сети ICRF (International Celestial Reference Frame). Работа по созданию и корректировке сети ICRF выполняется Международной службой вращения Земли и систем координат — МСВЗ и СК, в международной транскрипции — International Earth Rotation and Reference Systems Service (IER и RSS) [1, 12, 51, 60].

К 1995 г. МСВЗ и СК были определены экваториальные координаты (прямые восхождения и склонения относительно точки весеннего равноденствия и Международного полюса Земли на 1991 г.) 212-ти внегалактических объектов по результатам двухлетних радиоинтерферометрических наблюдений с сверхдлинных баз [1, 4, 12, 31, 52]. Полученная таким образом космическая геодезическая сеть стала называться Международной опорной системой отсчета ICRF [1, 4, 10, 48, 51, 56].

Координаты 212-ти внегалактических объектов в системе координат ICRS связаны с системой истинных небесных (инерциальных) координат Международного космического фундаментального каталога FS [1]. Число наблюдаемых внегалактических объектов для реализации системы координат ICRS ежегодно увеличивается: на 1999 г. число их достигло 294, к 2003 г. — 667 [1, 12].

Точность фиксирования координатных осей, включая систему счета времени, с учетом постоянства осей в космическом (небесном) пространстве принято считать равной $0,00002''$ [1, 41,44]. При

этом, в отличие от учитываемых собственных движений звезд галактик, собственные движения внегалактических объектов считают равными нулю [1, 31].

Точность определения экваториальных координат внегалактических радиоисточников на 2003 г., в среднем, равна [1]:

- часовых углов (или прямых восхождений) $\pm 0,00035''$;
- склонений $\pm 0,00040''$.

С системой опорных небесных координат (ICRS) и ее реализацией — Международной опорной системой отсчета (ICRF) связаны Международная общеземная система координат (ITRS) и ее реализация — Международная система отсчета (ITRF) (см. Введение и главу 1).

После корректировки ориентирования осей и положения начала геоцентрических пространственных прямоугольных координат системы ITRS по данным опорной небесной системы отсчета ICRF, первая используется при мониторинге движения полюсов Земли, собственных движений звезд и смещения литосферных плит Земли [1, 12, 41, 53].

В свою очередь, Международная геоцентрическая пространственная прямоугольная система отсчета ITRF используется для корректировки мировых систем координат ПЗ-90, WGS-84 и GPS 80, используемых при обработке результатов наблюдений спутников соответственно систем ГЛОНАСС, GPS и DORIS (см. Введение).

Планируется использовать систему отсчета ITRF и для обслуживания Международной спутниковой системы Галилео (Galileo) [1, 41].

§ 7. ЭКЛИПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ

Основной отсчетной плоскостью в этой звездной (небесной) системе координат, используемой для определения положения небесных тел в небесном (космическом) пространстве, является плоскость эклиптики, проведенная через центр небесной сферы принятого радиуса r под углом $\varepsilon = 23^{\circ}27'$ к плоскости небесного экватора. След пересечения плоскости эклиптики с небесной сфе-

рой образует круг эклиптики радиуса r (рис. 12). Окружность круга эклиптики принято называть эклиптической по отношению к небесной сфере. Как показано выше (см. главу 4 § 2), линия, проведенная через центр небесной сферы, перпендикулярно плоскости эклиптики, является осью эклиптики $RM R'$, а точки пересечения последней с поверхностью небесной сферы принято называть полюсами эклиптики. Точка R обозначает Северный полюс эклиптики, R' — Южный полюс эклиптики.

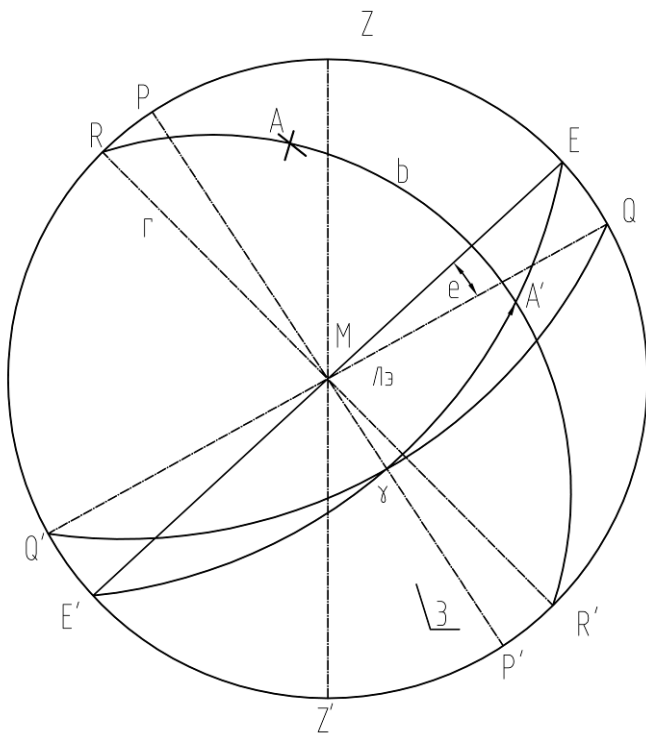


Рис. 12. Эклиптическая система небесных координат:

M — точка наблюдений на поверхности Земли; A' — проекция небесного тела A на эклиптику $E\gamma E'M$; $Q\gamma Q'M$ — небесный экватор; PP' — ось мира; ZZ' — отвесная линия точки M

Эклиптические координаты небесного тела A (эклиптическая широта β и эклиптическая долгота λ_3) являются сферическими: отнесены к небесной сфере радиуса r и отсчитываются по дугам больших кругов небесной сферы.

β — дуга большого круга небесной сферы, проходящего через ось эклиптики RR' и небесное тело A . Большой круг RAR' называют кругом эклиптических широт. Величину β отсчитывают от плоскости эклиптики в обе стороны. По направлению к Северному полюсу эклиптики значения β будут положительными ($0^\circ < \beta < 90^\circ$), к Южному — отрицательными.

λ_3 — дуга окружности круга эклиптики (большого круга небесной сферы, лежащего в плоскости эклиптики), заключенная между начальным эклиптическим полукругом широт и эклиптическим полукругом широт, проходящим через небесное тело. Начальный полукруг эклиптических широт проходит через точку γ (точку весеннего равноденствия — точку пересечения небесного экватора и эклиптики). Величину λ_3 отсчитывают от начального полукруга эклиптических широт против хода часовой стрелки в диапазоне от 0° до 360° . Можно представлять эклиптические долготы и в часовой мере в диапазоне от 0 до 24 часов.

Эклиптику неправильно идентифицируют (отождествляют) с орбитой Земли. Орбитой Земли при ее обращении вокруг Солнца является эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце. Эклиптику можно представить как сферическую модель орбиты Земли — пути Земли вокруг Солнца (видимого с поверхности Земли пути Солнца) [31, 33, 38].

§ 8. ГАЛАКТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НЕБЕСНЫХ КООРДИНАТ

В теоретической астрономии, включающей астрономию и космическую геодезию, находит применение галактическая система небесных координат. Основной линией этой координатной системы служит ось галактики $P_G P'_G$, составляющая с осью мира PP'

угол $\omega = 62^{\circ}6'$ (рис. 13) [38]. Точки пересечения оси галактики с небесной сферой принятого радиуса r называют соответственно: P_G — Северным полюсом галактики (расположен ближе к Северному полюсу мира P); P'_G — Южным полюсом галактики.

Как все системы небесных координат галактическая координатная система привязана к оси вращения Земли, совпадающей или параллельной оси мира PP' . На рисунке 13 приведена схема геоцентрической небесной сферы (см. главу 4 § 2) — центр небесной сферы O совмещен с центром масс Земли.

Начальными отсчетными плоскостями в галактической системе координат являются: плоскость галактического экватора $G\gamma_G G'$ и начальный полукруг галактических широт $P_G\gamma_G P'_G$. Последний не показан на рисунке 13. Он проходит через ось галактики и восходящий узел γ_G галактического экватора — точку пересечения небесного экватора и галактического экватора.

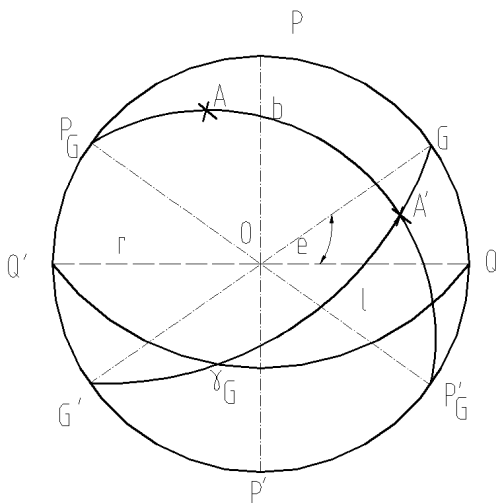


Рис. 13. Галактическая система небесных координат: $QQ'\gamma_G$ — небесный экватор; A' — проекция небесного тела A на галактический экватор

Координаты Северного полюса P_G галактики во 2-й экваториальной системе небесных координат (см. главу 4 § 3) на эпоху 1950,0 принимают равными: склонение $\delta_G = 27,4^\circ$; прямое восхождение $\alpha_G = 12^h 49^m$ [2, 38].

Галактическими координатами являются галактическая широта b и галактическая долгота ℓ .

b — дуга большого полуокруга галактических широт, проходящего через небесное тело A (см. рис. 13). Величина b отсчитывается в обе стороны от галактического экватора в диапазоне $0^\circ - 90^\circ$.

ℓ — дуга галактического экватора, отсчитанная от восходящего узла γ_G галактического экватора против хода часовой стрелки в диапазоне $0^\circ - 360^\circ$, или от 0^h до 24^h в часовой мере.

Галактическую систему небесных координат удобно применять при учете собственных движений звезд для вычисления поправок в эфемериды спутников навигационных систем GPS, ГЛОНАСС и др.

§ 9. СВЯЗИ МЕЖДУ НЕБЕСНЫМИ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ

Рассмотрим связь между первой и второй экваториальными системами координат. Эта связь пригодится нам при рассмотрении вопросов счета времени в 5-й главе.

Из рисунка 14 следует, что часовой угол точки весеннего равноденствия t_γ численно равен сумме прямого восхождения α и часового угла t любого небесного тела и выражает, по определению, величину Всемирного (Гринвичского) времени S [38]:

$$t_\gamma = S = \alpha + t. \quad (29)$$

Так как время S принято выражать в часовой мере, то в таких же единицах должны быть выражены α и t небесных тел. Понятия величин α и t приведены в § 1 данной главы.

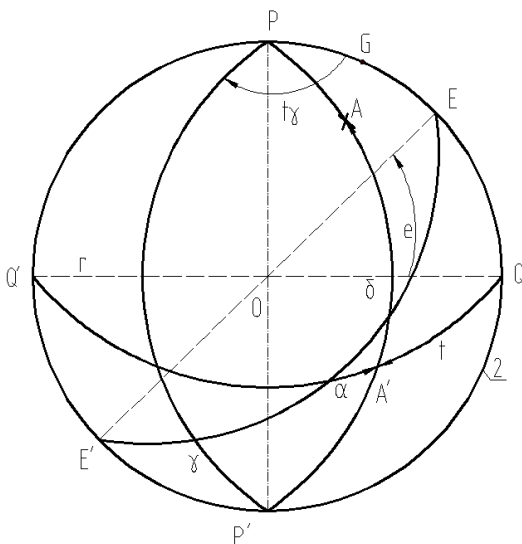


Рис. 14. Связь между 1-й и 2-й экваториальными системами небесных координат и Всемирным звездным временем: O — центр небесной сферы заданного радиуса r ; QQ' — полукруг небесного меридиана; $E\gamma E'$ — полукруг эклиптики; PP' — ось мира

Теперь рассмотрим связь между астрономическими координатами пунктов земной поверхности (астрономической широтой φ и астрономической долготой λ) и горизонтальными сферическими координатами небесных тел (астрономическим азимутом A и зенитным расстоянием Z).

Построим большой круг небесной сферы с центром в пункте M земной поверхности (рис. 15).

Астрономическая широта φ пункта M , по определению, равная вертикальному углу, измеренному на точке M между отвесной линией и плоскостью экватора, равна высоте полюса (точки P небесной сферы) h_p над горизонтом (полуденной линией NS) и одновременно склонению δ_z зенита (точкой Z небесной сферы):

$$\varphi = h_p = \delta_z. \quad (30)$$

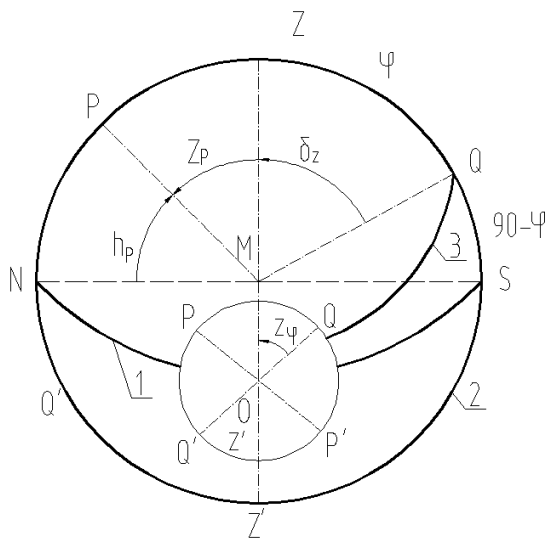


Рис. 15. Связь между астрономической широтой пункта M земной поверхности, высотой полюса над горизонтом и склонением зенита: PM — полюсь мира; Z — зенит точки M ; QM — радиус небесного экватора 3; NS — полученная линия с точками севера N и юга S ;
 1 — небесный горизонт; 2 — небесный меридиан точки M и он же круг склонений точки Q и вертикал точки P

Напомним, что кругом склонений называют большой круг небесной сферы, проходящий через ось мира PP' и исследуемую точку (в нашем примере точку M земной поверхности). Кругом высот, в котором измеряют зенитные расстояния относительно отвесной линии и высоты относительно небесного горизонта, принято называть вертикалом исследуемой точки. Вертикал, являясь большим кругом небесной сферы, проходит через отвесную линию и содержит исследуемую точку M .

В основном фрагменте рисунка 15 в одной плоскости изображены три больших круга небесной сферы: небесный меридиан точки M земной поверхности; круг склонений экваториальной точки Q

и вертикал точки P . Центр небесной сферы помещен в точку M (см. главу 4 § 2).

Установим связь между часовыми углами небесного тела, характеризующими его положение в двух пунктах земной поверхности в один и тот же физический момент времени, с астрономическими долготами этих пунктов.

Пусть небесное тело A наблюдают с двух пунктов земной поверхности M и K , поместим центр небесной сферы O в центр масс Земли (примем геоцентрическую схему небесных координат), а ось мира PP' расположим параллельно рамке листа (рис. 16а).

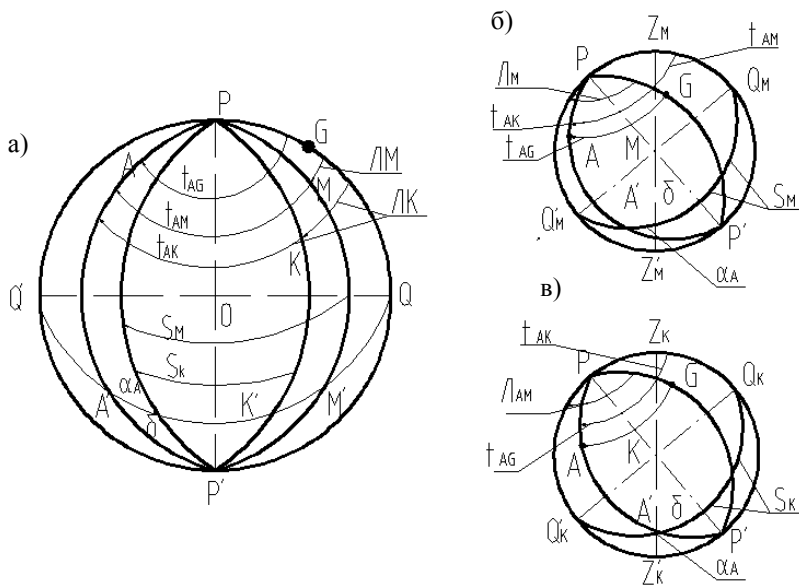


Рис. 16. Связь между часовыми углами небесного тела A и астрономическими долготами наземных пунктов K и M : PP' — ось мира; QQ' — диаметр небесного экватора; ZZ' — отвесные линии точек земной поверхности; 1 — начальный (Гринвичский) меридиан; A' — сферическая проекция тела A на небесный экватор 2; 3 — круг склонений тела A ; γ — точка весеннего равноденствия; Q_K и Q_M — радиальные проекции пунктов K и M на небесную сферу в плоскости небесного экватора

Напомним, что астрономической долготой λ_M пункта M земной поверхности является двухгранный угол, заключенный между начальным (Гринвичским) меридианом и астрономическим меридианом пункта M . Астрономическим меридианом пункта M называют большой полукруг небесной сферы, проведенный через ось мира и проекцию отвесной линии пункта наблюдений M на небесную сферу.

На рисунке 16б и рисунке 16в приведены варианты небесной сферы с центром ее в точках наблюдений небесного тела A (пунктах K и M земной поверхности). Астрономические меридианы пунктов K и M на рисунке 16б и рисунке 16в, расположенные в плоскости чертежа, составляют с плоскостью начального меридиана 1 углы, равные соответственно астрономическим долготам λ_K и λ_M точек K и M .

Положение небесного тела A в 1-й экваториальной системе небесных координат может быть определено гринвичским часовым углом t_{AG} и часовыми углами $t_K = \overline{\gamma Q_K}$ и $t_M = \overline{\gamma Q_M}$, определенными на пунктах K и M в один физический момент времени (см. рис. 16а).

В работе [38] доказывается теорема: «Разность часовых углов светила (небесного тела), характеризующих его положение в один и тот же физический момент времени в разных пунктах, равна разности астрономических долгот этих пунктов». На рисунке 16а показаны часовые углы t_{AK} и t_{AM} небесного тела A , определенные относительно астрономических меридианов точек K и M , астрономические долготы λ_K и λ_M этих пунктов, прямое восхождение α_A , часовой угол t_{AG} тела A , отсчитанного от гринвичского меридиана 1 (G). На рисунке 16б и в приведены схемы небесных сфер, центр которых помещен в точках наблюдений небесного тела A , с показом вышеназванных параметров и местного звездного времени S_K и S_M на меридианах K и M .

На основании изложенной теоремы и поясняющего рисунка 16 запишем:

$$t_{A-M} - t_{A-K} = S_M - S_K = \lambda_M - \lambda_K. \quad (31)$$

Сделаем практические выводы анализа соотношений (30) и (31). Если в результате астрономических наблюдений определено положение полюса мира или зенита пункта земной поверхности относительно принятой системы координат, то можно будет получить астрономическую (географическую) широту наземного пункта, используя выражение (30).

Если определено местное одноименное время (звездное, солнечное, атомное: см. главу 5) в один и тот же физический момент в двух пунктах земной поверхности, то по формуле (31) можно вычислить разность долгот этих пунктов.

Итак, в данной главе изложены основные сведения о системах небесных координат, необходимые специалистам, выполняющим обработку спутниковых наблюдений, при географическом, геодезическом и картографическом мониторинге Земли.

Вопросы перехода координат от одной системы к другой рассмотрены в работах [3, 9, 11, 15, 29, 39-43].

ГЛАВА 5. СИСТЕМЫ СЧЕТА ВРЕМЕНИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ОБРАБОТКЕ ТРАДИЦИОННЫХ И СПУТНИКОВЫХ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При производстве астрономо-геодезических наблюдений, радиоинтерферометрических измерений сверхдлинных баз, при использовании спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, DORIS, а в некотором будущем и Galileo, для целей позиционирования (определения местоположения) необходимо знание точного времени.

В современной астрономии (измерительной астрономии) и космической геодезии, составной частью которой является спутниковая геодезия, используют два аспекта (понятия, определения) времени: эпоху и интервал времени.

Эпохой называют момент события — зафиксированное реальное (текущее) время свершения события от принятого начала заданной системе счета времени.

Интервал времени есть промежуток времени между событиями, зафиксированными эпохами. Под событием при рассмотрении систем счета времени будем понимать излучение или прием электромагнитных сигналов.

При решении вышеперечисленных задач используют, в основном, два вида электромагнитных сигналов: непрерывные колебания несущих и модулированных электромагнитных волн; дискретные (прерывистые) колебания этих волн. Дискретные колебания электромагнитных волн принято называть импульсами [1, 12, 54]. Модулированные (преобразованные по определенному закону) импульсы называют кодами. Часто понятия импульс и код отождествляют: делают их взаимозаменяемыми. **Импульсы (коды)** — кодированные электромагнитные сигналы — получают из непрерывных колебаний электромагнитных волн, вырабатываемых синтезаторами рабочих частот из колебаний опорных генераторов.

Поясним понятия несущих и модулированных на их основе колебаний. На каждом из 27 спутников GPS работают четыре опорных генератора (рубидиевые и цезиевые), которые поддерживают единую опорную (фундаментальную) частоту $F = 10,23 \text{ МГц}$ (Мега Герц = 10^6 Герц). В будущем планируется устанавливать в качестве опорного более стабильный (вырабатывающий и удерживающий высокий уровень 10^{-14} с постоянства F) водородный эталонный генератор. Так как опорные генераторы являются одновременно гарантами постоянства фундаментальной частоты и Единого системного времени, их часто называют часами или бортовыми эталонами времени и частоты (БЭВИ). В ГЛОНАСС F равна $5,11 \text{ МГц}$ [12].

На спутниках на основе работы опорных генераторов формируются несущие колебания. В GPS частоты несущих колебаний (несущие частоты) составляют: $L_1 = 10,23 \times 154 = 1575,42 \text{ МГц}$; $L_2 = 10,23 \times 120 = 1227,60 \text{ МГц}$. Эти частоты одинаковы для всех спутников GPS и соответствуют дециметровому диапазону электромагнитных волн с длинами: $\lambda_1 = 19,0 \text{ см}$; $\lambda_2 = 24,4 \text{ см}$ [1, 12].

В ГЛОНАСС для каждого спутника формируется своя пара несущих частот $f_{1,k}$ и $f_{2,k}$, вычисляемых из выражений [12]:

$$f_{1,k} = f_{1,0} + k \cdot \Delta f_1; \quad f_{2,k} = f_{2,0} + k \cdot \Delta f_2, \quad (32)$$

где $f_{1,0}$ и $f_{2,0}$ — базовые рабочие частоты, равные $f_{1,0} = 1602,000 \text{ МГц}$, $f_{2,0} = 1246,000 \text{ МГц}$; $\Delta f_1 = 0,5625 \text{ МГц}$; $\Delta f_2 = 0,4375 \text{ МГц}$; k — номер спутника.

Электромагнитная волна может нести нужную информацию, если она модулирована: один из параметров (амплитуда, частота, фаза, поляризация) изменяется по заданному закону. Вид модуляции (амплитудная, частотная и др.) зависит от специфики решаемых задач: определения пространственных координат точек земной поверхности; передач точного времени в пределах $0,7 \text{ мкс}$ (микросекунды = 10^{-6} секунды); скорости и ее изменения перемещающихся объектов; оборонных, научных и других задач.

Кратко опишем бинарные коды (последовательности единиц и нулей), используемые в GPS.

Каждому спутнику GPS соответствует своя последовательность бинарных кодов, называемая PRN (Pseudo Random Noise) — псевдослучайным шумом. Последовательности PRN-кодов легко идентифицируются аппаратурой пользователя (многоканальными спутниковыми приемниками). Последние могут работать на одной частоте L_1 или быть двухчастотными (с частотами L_1 и L_2). Каждый спутниковый приемник имеет не менее 9 каналов. Каждый канал принимает определенные сигналы спутников [12].

По системе кодов PRN изучается спутником (передается чипами потребителю на спутниковый приемник) два кодовых сигнала: C/A-код и P-код. Чип (chip) — элементарная посылка. Это радиосигнал нулевого или единичного уровня в бинарном импульсном коде — варианте последовательности нулей и единиц. Число чипов, укладываемых в секунду, называют частотой следования элементарных посылок, или просто частотой чипов (Chip rate). Например, для C/A-кода Chip rate равна $1023000 = 1,023 \cdot 10^6$ посылок/с.

Оба кода независимо друг от друга формируются на спутнике на основе работающего опорного генератора (одного из четырех с частотой $F = 10,23$ МГц). При этом, при формировании C/A-кода частоту F уменьшают в 10 раз. P-код формируется без изменения опорной частоты F .

Получив переданную спутниками в кодированном виде информацию (эпоху излучения электромагнитного сигнала, эфемериды спутника, метеоданные и др.), потребитель фиксирует эпоху приема излученного сигнала по шкале времени спутникового приемника и вычисляет расстояние (дальность) между спутниками и точкой земной поверхности. Методика производства спутниковых наблюдений, их предварительная и окончательная обработка освещена в [1, 12, 55, 57]. Окончательную обработку спутниковых наблюдений, выполняемую в камеральных условиях, принято называть постобработкой.

C/A-код (Coarse/Acquisition) — «грубое приобретение» является последовательностью из 1023 бинарных цифр (нулей и единиц). Чип (сочетание из 1023 бит) имеет продолжительность (период), равный примерно микросекунде, и передается по коду C/A, как указано выше, с частотой, равной $0,1 F$. То есть тактовая частота L_{ch} генерации чипа равна 1,023 МГц (МГц равен 10^6 Гц).

Значение периода T_{ch} генерации чипа на спутнике GPS получено из тривиального соотношения, как величины, обратной частоте:

$$T_{ch} = \frac{1}{L_{ch}} = \frac{1}{1,023 \cdot 10^6} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ с.} \quad (33)$$

По определению, частота электромагнитного сигнала, каковым является чип, измеряется в герцах (Гц). Гц есть одно колебание в секунду [54].

Периоду чипа соответствует расстояние (длина волны сигнала C/A-кода) λ_{ch} , равная примерно:

$$\lambda_{ch} = \frac{c}{L_{ch}} = c \cdot T_{ch} = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6} \approx 300 \text{ м,} \quad (34)$$

где c — скорость распространения электромагнитных сигналов, принятая равной для приблизительных расчетов 300 000 000 м/с. Сокращенно величину c называют скоростью света.

C/A-код, соответствующий определенному спутнику (в GPS для спутников отведено 32 неповторяющихся последовательностей из 1023 бит), повторяется каждую миллисекунду. Такой период повторяемости кода позволяет потребителю (спутниковому приемнику) быстро поймать (захватить) излучаемый сигнал и выполнить необходимые измерения. Так, измерив интервал времени τ прохождения электромагнитного сигнала от спутника до спутникового приемника, можно определить расстояние (дальность) R между спутником и приемником из выражения [54]:

$$R = c \cdot \tau, \quad (35)$$

где c — скорость света.

C/A-коды передаются спутникам путем модуляции несущей частоты L_1 , они доступны всем потребителям.

Принято считать, что точность определения расстояний R по C/A-коду равняется примерно 3-м метрам [1, 12]. Такая точность позволяет решать навигационные задачи (позиционирования морских и воздушных судов) и значительный объем хозяйственных задач, связанных с определением местоположения различных объектов. Более высокая точность может быть достигнута при более короткой длине чипа.

P-код (precise-код), являющийся по отношению к C/A-коду более точным, также формируется от опорного генератора спутника. При этом опорная частота $F = 10,23$ МГц в GPS не меняется.

Тактовая частота, используемая для генерации P-кода, как указано выше, равна $L'_{ch} = 10,23$ МГц. То есть длина волны чипа в этом коде короче длины чипа в C/A-коде в 10 раз:

$$\lambda'_{ch} = \frac{c}{10,23 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-7} \approx 30 \text{ м.} \quad (36)$$

В отличие от C/A-кода, содержащего 1023 бинарных цифр (нулей и единиц), P-код является электромагнитным сигналом с весьма длинной последовательностью нулей и единиц, которая не повторяется 38 недель (около 266 суток). Каждому спутнику GPS выделяется недельный сегмент P-кода. Каждую неделю в полночь с субботы на воскресенье специальная программа запускает (инициализирует) начальную последовательность выделенного конкретному спутнику недельного сегмента кода.

P-код передается спутникам на обеих несущих частотах L_1 и L_2 в зашифрованном виде, чтобы ограничить доступ несанкционированным пользователям. После шифровки (Anti — Spoofing — «антимистификация») P-код получил название Y-кода.

По P-коду расстояния от спутника до точек земной поверхности можно определять с точностью 0,3 м (1% от длины волны чипа) [1, 12].

Сформированные на базе опорной частоты F C/A-код и P-код передаются на Землю на несущих частотах: C/A-код на частоте L_1 ; P-код и частоте L_1 и на частоте L_2 . Об этом сказано выше. Волны несущей частоты преобразовываются способом бинарной парафазной модуляции, относящейся к фазовому способу модуляции волн. В конце полупериода фаза электромагнитного сигнала изменяется (перебрасывается) на 180° . Для бинарных чипов может быть только два состояния фазы: нормальное состояние, представляющее бинарный ноль; состояние зеркального изображения, представляющее бинарную единицу.

На основании вышесказанного опишем в общем виде структуру электромагнитного сигнала, излучаемого спутником GPS.

На основе работы опорного генератора с постоянной частотой F формируются два гармонических (синусоидальных) колебания несущих частот L_1 и L_2 (рис. 17). Параллельно на базе F генерируются чипы C/A-кода и P-кода (так называемых дальномерных кодов).

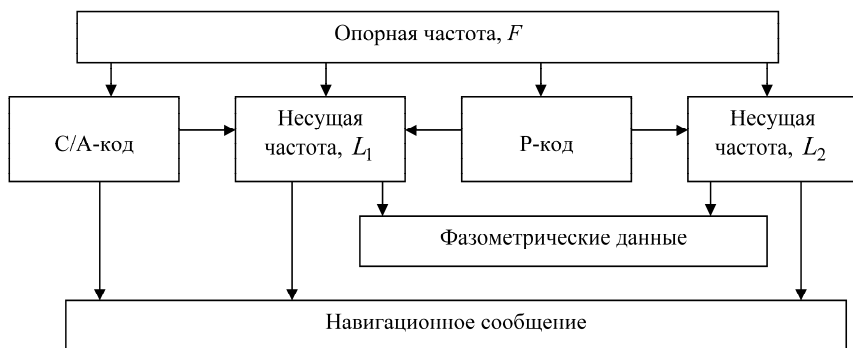


Рис. 17. Структура сигнала спутника GPS

Несущая частота L_1 (для одночастотных спутниковых приемников) модулируется дальномерными кодами. Затем в сумматоре на L_1 накладываются навигационное сообщение и данные о фазе

посылаемого сигнала, и объединенный сигнал поступает на антенное устройство спутника — лучевую антенну каналов, работающих на частоте L_1 .

Несущая частота L_2 (для двухчастотных спутниковых приемников) моделируется Р-кодом, получает данные о состоянии фазы и навигационное сообщение. Суммарный электромагнитный сигнал поступает на антенное устройство спутника — мировую антенну каналов, работающих на частоте L_2 .

Применительно к ГЛОНАСС кодовые посылки (чипы) получили название узкополосного кода (СТ-код с частотой $f_{СТ} = 0,511$ МГц) и широкополосного кода (ВТ-код с тактовой частотой $f_{ВТ} = 5,11$ МГц). Передача со спутников кодов СТ и ВТ производится посредством модуляции своей пары несущих частот дециметрового диапазона [12].

Навигационное сообщение, передаваемое спутником на несущих частотах L_1 и L_2 со скоростью 50 бит в секунду, включает следующие данные: параметры часов, бортовые эфемериды (эфемериды), сведения о состоянии ионосферы (модель ионосферы), альманах.

Альманах содержит сведения о приближенных параметрах орбит спутника (аргументе перигея, долготе узла в эпоху недели и др.), показателях часов в системе времени GPST и др. Данные альманаха позволяют облегчить поиск спутников спутниковыми приемниками.

Кратко остановимся на режиме времени спутников GPS. Как указывалось выше, на спутниках GPS используется атомное время, формируемое на основе работы опорного генератора (рубидиевого, цезиевого или водородного) с фундаментальной частотой $F = 10,23$ МГц.

На спутниках GPS введено с 6 января 1980 г. системное время GPS Time (GPST), задаваемое цезиевыми стандартами времени главной станцией управления и контроля GPS (штат Колорадо, США) [1, 12].

В GPST наибольшей единицей времени является неделя GPST, содержащая 604 800 секунд. Эпоха (фиксированный момент свершения события) идентифицируется с числом в интервале времени, которое прошло от предыдущей полуночи с субботы на воскресенье.

Номера недель GPST имеют значения от 0 до 1023. Неделя с номером 0 началось 6 января 1980 г., а неделя с номером 1023 закончилась 21 августа 1999 г. 22 августа 1999 г. номер недели был переведен на 0 и начался новый цикл счета GPST.

Параметры часов спутника (дрейф-ход, поправки в эпохи и др.) вычисляются на секторе (сегменте) контроля и управления GPS по результатам наблюдения конкретного спутника станциями слежения, расположенными по всей территории нашей планеты. В совокупности, введение поправок в показания бортовых (атомных) часов называют синхронизацией часов спутника, т. е. шкала времени часов спутника должна быть сверена со шкалой времени стандарта времени главной станции управления и контроля GPS.

Определенные на Земле параметры часов спутника закладываются с заданной периодичностью в память бортового компьютера (на спутнике) и передаются потребителю в составе навигационного сообщения.

Системное время ГЛОНАСС корректируется по Государственному эталону частоты и времени Российской Федерации. Расхождение шкал часов спутников ГЛОНАСС и стандартного времени поддерживается в пределах микросекунды (10^{-6} с). В навигационном сообщении спутника ГЛОНАСС передается дополнительно в составе навигационного сообщения поправка перехода системного времени ГЛОНАСС к системе всемирного координированного времени UTC (атомного времени).

При решении практических задач время выполняет, в основном, три функции: является одним из компонентов при определении дальностей (расстояний между наземными пунктами и ИСЗ); выступает независимым аргументом в управлениях движения небесных тел; позволяет осуществлять переход систем звездных координат в общеземные координатные системы, в частности ПЗ-90 и WGS-84.

По виду используемых физических явлений различают три типа времени: звездное, солнечное и атомное [12, 38].

§ 2. ЗВЕЗДНЫЕ СИСТЕМЫ СЧЕТА ВРЕМЕНИ

Звездные системы счета времени основаны на явлении видимого суточного движения звезд, в т. ч. виртуальной (существующей в воображении) точки весеннего равноденствия γ .

Звездное время s есть, по определению [2, 38], часовой угол t_γ точки весеннего равноденствия (рис. 18), выраженный в часовой мере:

$$s = t_\gamma. \quad (37)$$

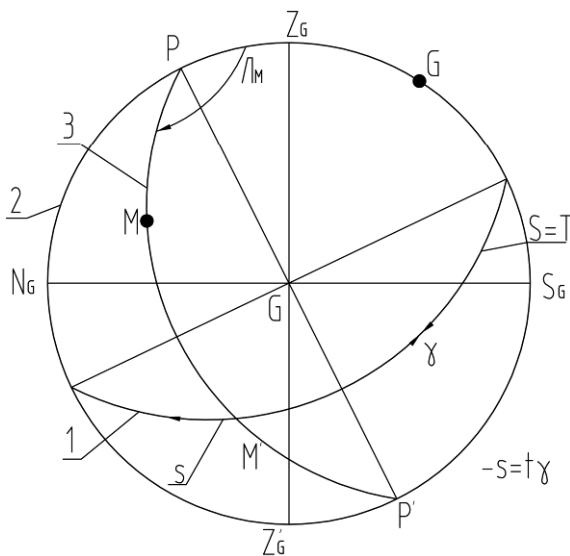


Рис. 18. Система отсчета звездного времени: 1 — плоскость небесного экватора; 2 — плоскость астрономического меридиана Гринвича; 3 — плоскость астрономического меридиана точки M ; PP' — ось мира; $N_G S_G$ — полуденная линия горизонта Гринвича с зенитом Z_G ; λ — астрономическая долгота точки M ; s — местное звездное время (отсчитанное от меридиана точки местности M)

Если звездное время отсчитано от астрономического меридиана точки наблюдения M , его называют **местным звездным временем** s . Если за начало счета времени принят астрономический меридиан Гринвича (главного астрономического центра Гринвичской обсерватории), то звездное время называют **Всемирным звездным временем** S [38]:

$$S = T, \quad (38)$$

где T — часовой угол точки весеннего равноденствия, отсчитанный от Гринвичского меридиана по ходу часовой стрелки в пределах от 0 до 24 часов.

Единицей измерения звездного времени являются звездные сутки. Звездными сутками принято называть интервал времени между двумя прохожденьями точки весеннего равноденствия γ астрономического меридиана (последовательными верхними кульминациями точки γ), проведенного через точку отсчета, например, Гринвич. Под астрономическим меридианом будем понимать полуокружность $PZ_G GP'$ небесной сферы принятого радиуса — след сечения полуплоскости $OPZMP'$ небесной сферы с плоскостью QOQ' небесного экватора, по определению, перпендикулярного оси вращения Земли POP' . Напомним, что Z является точкой зенита (след пересечения отвесной линии места наблюдения с небесной сферой в северном полушарии). Отвесная линия перпендикулярна касательной к уровенной поверхности точки наблюдения — точки стояния геодезического или астрономического прибора. Касательная к уровенной поверхности, фиксируемой уровнем астрономо-геодезического прибора, лежит в плоскости горизонта точки наблюдения (см. рис. 18). Звездные сутки содержат 24 звездных часа. Звездный час равен 60 звездным минутам или 3600 звездным секундам.

Звездное время определяют по результатам наблюдения звезд. Всемирное звездное время S (часовой угол точки γ) можно получить, измерив прямое восхождение α любого светила и его часовой угол t (см. главу 4 § 3):

$$S = \alpha + t. \quad (39)$$

Местное звездное время s , отнесенное к астрономическому меридиану точки наблюдения, вычисляют по формуле [38]:

$$s = S - \lambda, \quad (40)$$

где λ — астрономическая долгота точки наблюдения, выраженная в часовой мере; S — Всемирное звездное время. Чтобы избежать отрицательных значений s , к результату формулы (40) добавляют 24^h .

§ 3. СОЛНЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ СЧЕТА ВРЕМЕНИ

Солнечные системы счета времени основаны на явлении видимого суточного движения Солнца с учетом фактора годичного движения Земли вокруг Солнца. Различают действительное солнечное время, истинное и среднее солнечное время [38].

Действительное солнечное время равно часовому углу t действительного Солнца — углу между плоскостью астрономического меридиана точки отсчета и плоскостью круга склонения Солнца (см. рис. 7) на момент его верхней кульминации (как любого светила).

Истинное солнечное время t_u отличается от величины t на 12^h (12 часов) в сторону уменьшения, так как фиксируется на момент нижней кульминации Солнца на отсчетном меридиане, т. е. истинное время равно [38]:

$$t_u = t - 12^h. \quad (41)$$

Видимое движение действительного Солнца — неравномерное по причине изменения скорости движения Земли по эклиптике в течение года, что привело к введению среднего солнечного времени.

Среднее солнечное время t равно часовому углу t_{cp} среднего Солнца (виртуальной точки, равномерно движущейся по эклиптике в течение года), отличающемуся на 12^h :

$$m = t_{cp} - 12^h. \quad (42)$$

Связь величин t и m осуществляется выражением [2]:

$$m = t - (12^h + \eta), \quad (43)$$

где $(12^h + \eta)$ — поправка к часовому углу t действительного Солнца, определенному астрономическими методами. Величина $(12^h + \eta)$ приводится в Астрономическом ежегоднике в таблице «Солнце» на 0^h Всемирного времени каждых суток (полночь — момент нижней кульминации на Гринвичском меридиане среднего Солнца) [2, 38].

Всемирным временем $M(T)$ принято называть среднее солнечное время Гринвичского меридиана. По международной классификации времени M соответствует время UT_1 (Universal Time 1) — среднее солнечное время на среднем Гринвичском меридиане. Положение последнего в пространстве определяется относительно МУН с учетом движений полюсов Земли (см. главу 4 § 1). Всемирное время UT_1 (его улучшенный аналог UT_2 , учитывающий дополнительно влияние периодических изменений скорости суточного вращения Земли) не следует смешивать со Всемирным координированным временем UTC . Об UTC разговор будет несколько ниже.

Местное среднее солнечное время m , отнесенное к меридиану точки наблюдения с долготой λ , связано с величиной M выражением:

$$m = M - \lambda, \quad (44)$$

где λ — астрономическая долгота точки наблюдения.

Единицей измерения среднего солнечного времени служат средние солнечные сутки, содержащие 24 средних солнечных часа. Каждый час равен 60 минутам или 3600 секундам.

Заметим, продолжительность истинных звездных суток короче продолжительности средних солнечных суток на 3 минуты и 55,909 секунды (в средних солнечных единицах). Это расхождение вызва-

но встречным видимым движением светил относительно видимого движения Солнца по эклиптике.

В заключение дадим понятие Всемирного мгновенного времени UT_0 (Universal Time 0). UT_0 — время на мгновенном Гринвичском меридиане, проведенном через мгновенный полюс Земли. UT_0 определяется из астрономических наблюдений суточных движений звезд [12, 38].

Связь величин UT_0 , UT_1 и UT_2 описывается выражениями [12, 38]:

$$UT_1 = UT_0 + \Delta\lambda, \quad (45)$$

$$UT_2 = UT_1 + \Delta T_S. \quad (46)$$

Поправки $\Delta\lambda$ и ΔT_S определяются по методике, описанной в [38]. Они учитывают явления прецессии, нутации и изменение угловой скорости суточного вращения Земли. Вопросами регулирования шкал систем Всемирного времени занимается служба IERS (см. Введение).

§ 4. АТОМНОЕ ВРЕМЯ

Атомное время AT (Atome Time) является физическим временем в отличие от астрономического (звездного и солнечного). В Международной системе SI [54] за единицу измерения AT принята атомная секунда, продолжительность которой равна 9 192 631 770 периодов колебаний атома изотопа цезия 133 при переходе им смежных энергетических уровней. Такой физический интервал времени, отличающийся постоянством, был выбран для того, чтобы максимально приблизить атомную секунду к величине средней секунды астрономических систем счета времени. В 1955 г. атомное время введено в качестве основного стандарта времени и получило по Международной системе научных единиц аббревиатуру TA_1 [1, 12].

Шкала TA_1 была совмещена в январе 1958 г. со шкалой Всемирного времени UT_1 , а в январе 1964 г. — со шкалой UT_2 [1, 38].

Чтобы приблизить шкалу стабильного атомного времени (за 15 000 лет атомные часы убегают только на секунду) к реальному солнечному времени (среднему m и M) с 1 января 1977 г. было введено Международное атомное время IAT (International Atomic Time). Позже время IAT стали обозначать аббревиатурой TAI (Time Atomique International).

Важно отметить следующее: привязка астрономо-геодезических наблюдений, особенно спутниковыми методами, к равномерной шкале атомного времени позволяет определять практически все параметры движения Земли по эклиптике и вокруг своей оси. В частности, часовые углы светил, полученные из астрономических наблюдений, позволяют вычислять поправки в непостоянное солнечное время, по которому мы живем.

Как и любое время, атомное время измеряется в сутках, которые содержат 24 часа. Час равен 60 минутам или 3600 секундам.

ГЛОССАРИЙ

Азимут астрономический — одна из компонент горизонтальной системы звездных координат; угол в плоскости небесного горизонта, отсчитанный от точки юга по ходу часовой стрелки до круга высот небесного тела в пределах от 0° до 360° .

Альмукантарат — малый круг, проведенный через небесное тело параллельно небесному горизонту.

Апогей — наиболее удаленная от Земли точка орбиты спутника. Понятия *апогея* и *перигея* относятся и к орбите Луны.

Аргумент перигея орбиты искусственного спутника Земли — угол в плоскости орбиты спутника, близкой к круговой, отсчитанный от направления на восходящий узел орбиты спутника (точку пересечения орбиты спутника с небесным экватором) до направления на (точку наименьшего удаления спутника от Земли) орбиты спутника в пределах от 0° до 360° . Аргумент перигея считают по направлению движения спутника.

Афелий — наиболее удаленная от Солнца точка орбиты Земли или другого тела.

Балтийская система высот — система счета высот, началом которой является нулевой штрих измерительной рейки (футштока), закрепленной на устое одного из мостов в г. Кронштадте. В настоящее время используется Балтийская система высот 1977 г. взамен системы счета высот, принятой в 1942 г. В системе 1977 г. высоты точек земной поверхности отсчитывают от поверхности квазигеоида. Такие высоты принято называть нормальными.

В результаты геометрического нивелирования I и II-го классов, а в горной местности и в измерения, выполненные по программе III-го класса, вводят поправки за уклонение измеренной гравиметрами силы тяжести от ее нормального значения, рассчитанного по методике М. С. Молоденского.

Бинарный сигнал — результат парафазной модуляции несущей частоты спутника. Фаза перебрасывается с 0° на 180° . В коде (сиг-

нале) фазе 0° соответствует бит 0 в двоичной системе, а 180° — бит, равный 1.

Вертикал (см. также круг высот) — большой круг небесной сферы, проходящий через отвесную линию и светило. Точки пересечения отвесной линии с небесной называются *зенитом* и *надиром*. Зенит расположен ближе к Полярной звезде, надир — на противоположной стороне небесной сферы. Вертикал, перпендикулярный, кроме того и к небесному меридиану, называют *первым вертикалом*. Он пересекает небесный горизонт в точках запада и востока.

Время атомное — всемирное время *UTC*. Иначе его принято называть *координированным временем*. За атомную секунду принята продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения цезия изотопа 133 между двумя уровнями при нулевом магнитном поле. Атомное время введено в 1967 г. и используется во всех спутниковых системах. Для эталонирования атомного времени, вырабатываемого цезиевыми генераторами, используются водородные квантовые генераторы. Последние обеспечивают постоянство излучения порядка 10^{-14} секунды. С 1 января 1972 г. подаются радиостанциями службы времени сигналы, вырабатываемые атомными часами.

Время GPS — динамическое (подверженное изменению) атомное время, используемое на спутниках спутниковой системы GPS. Иначе его называют системным временем — *GPS Time (GPST)*. *GPST* задается цезиевыми стандартами времени (генераторы излучения расположены на главной станции управления и контроля системы GPS — штат Колорадо, США).

В *GPST* наибольшей единицей времени является неделя *GPST*, содержащая 604 800 секунд (фиксированный момент свершения события) представляется как число в интервале времени, которое прошло от предыдущей полуночи с субботы на воскресенье.

Номера недель *GPST* имеют значения от 0 до 1023, неделя с номером 0 началась 6 января 1980 г., а неделя с номером 1023 за-

кончилась 21 августа 1999 г. 22 августа 1999 г. номер недели был переведен на 0 и начался новый цикл счета GPST.

Время звездное — часовой угол точки весеннего равноденствия. Если часовой угол отсчитан от астрономического меридиана точки наблюдений, его называют *местным звездным временем*.

Время солнечное равно часовому углу на эпоху (момент) его верхней кульминации. *Кульминацией небесного тела* принято называть явление прохождения небесным телом меридиана точки наблюдений.

Различают *истинное* и *среднее солнечное время*. *Истинное время* — часовой угол действительного Солнца, виртуально неравномерно движущегося по эклиптике. В периоде Земля движется вокруг Солнца. *Среднее солнечное время* есть часовой угол Солнца, виртуально равномерно движущегося по эклиптике (в природе Земля обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите).

Всемирным (Гринвичским) звездным временем принято называть часовой угол точки весеннего равноденствия, отсчитанный от Гринвичского меридиана.

Геодезическая высота — расстояние по нормали от точки физической поверхности Земли до поверхности отсчетного эллипсоида, равное сумме нормальной высоты и высоты квазигеоида.

Геоид — уровенная поверхность, проходящая через нуль Балтийской системы высот. *С геометрической точки зрения уровенная поверхность* есть поверхность, перпендикулярная отвесным линиям во всем множестве точек. *С физической точки зрения уровенная поверхность* имеет постоянный потенциал силы тяжести.

Горизонт небесный — большой круг небесной сферы, проведенный через точку наблюдений перпендикулярно отвесной линии. В плоскости небесного горизонта расположены точки юга, севера, запада и востока. В этой плоскости отсчитывают от точки юга астрономические азимуты.

Дальность — теоретическое расстояние между спутником и наземным пунктом в трехмерном пространстве. После вычисления поправки за несинхронность хода часов спутника и наземного приемника из псевдодальности получают искомое расстояние между

спутником и наземным пунктом, на котором установлен спутниковый приемник, т. е. получают дальность.

Долгота астрономическая — компонента географической (сферической) системы координат; двугранный угол между начальным (Гринвичским) и астрономическим меридианом точки наблюдений. *Долготы* различают *западные* и *восточные*: те и другие могут выражаться в градусах 0° - 180° , или в часах от 0^h до 12^h . На территории России долготы восточные, за исключением части Чукотки и Камчатки.

Долгота геодезическая — компонента эллипсоидальной (сфероидической) системы координат; двугранный угол между начальным (Гринвичским) и геодезическим (эллипсоидальным) меридианом точки наблюдений. Долготы измеряют в градусной мере в пределах от 0° до 360° или в часовой мере от 0^h до 24^h .

Астрономические и геодезические меридианы не совпадают вследствие уклонений отвесных линий от нормалей к отсчетному эллипсоиду. Астрономический меридиан проходит через отвесную линию точки наблюдений, геодезический меридиан содержит нормаль к эллипсоиду той же точки. Разности одноименных долгот двух пунктов равны между собой. Это правило учитывается при определении местного времени.

Долгота узла (восходящего) орбиты спутника — угол в плоскости небесного экватора, отсчитанный от направления из центра небесной сферы на точку весеннего равноденствия до направления на восходящий узел орбиты спутника против хода часовой стрелки в пределах от 0° до 360° . *Узлами* называют точки пересечения небесного экватора и орбиты спутника. *Восходящий узел* расположен справа, если смотреть на перигей орбиты спутника, *нисходящий узел* — слева.

Допплеровский эффект (доплеровский сдвиг) проявляется в том, что излучаемая спутником частота электромагнитной волны (обычно это радиоволны дециметрового диапазона) изменяется при приеме ее наземным спутниковым приемником. При сближении спутника и приемника принятая частота будет больше излучаемой, а при удалении спутника от приемника — меньше. Разность излу-

чаемой и принимаемой частот называют *доплеровским сдвигом*, а метод измерения дальностей (расстояний между спутником и приемником, расположенным на наземном пункте) — доплеровским методом.

В бывшем СССР по результатам наблюдений спутников системы ТРАНЗИТ доплеровским методом к 1990 г. были определены пространственные координаты 131 пункта Допплеровской геодезической сети (ДГС).

Зенитное расстояние небесного тела — компонента горизонтальной системы небесных координат; угол в плоскости вертикала (круга высот), отсчитанный от зенита до направления из центра небесной сферы, помещенного в точку наблюдений, на небесное тело. Зенитное расстояние считают в пределах от 0° до 90° в обе стороны от небесного горизонта. Дополнение зенитного расстояния до 90° называют *высотой небесного тела над горизонтом*.

Интервал времени — промежуток времени между двумя событиями, зафиксированными эпохами. Например, первым событием является излучение спутником радиосигнала, а вторым — прием этого сигнала наземным приемником.

Инерциальная система отсчета (координат) — система координат, либо покоящаяся относительно другой системы, принимаемой за неподвижную, либо движущаяся относительно нее прямолинейно и равномерно. При обработке спутниковых наблюдений *инерциальной системой координат* принято считать небесную координатную систему, удовлетворяющую следующим условиям: начало координат совпадает с центром масс Земли; ориентировка осей выполнена относительно точки весеннего равноденствия и условного полюса, заданного на определенную эпоху.

Квазигеоид (почти геоид) — вспомогательная виртуальная поверхность, отстоящая от физической поверхности Земли на величину нормальных высот. Последние с достаточной для практики точностью определяются по результатам геометрического и тригонометрического нивелирования и гравиметрических измерений силы тяжести.

Круг высот — большой круг небесной сферы, проведенный через отвесную линию точки наблюдений. *Отвесная линия* содержит зенит и надир (точки пересечения небесной сферы с отвесной линией). В круге высот отсчитывают зенитные расстояния небесных тел или соответствующие им высоты тел над горизонтом.

Круг склонений — большой круг небесной сферы, проведенный через ось мира (ось вращения Земли) и небесное тело. Круг склонений перпендикулярен небесному экватору и служит для отсчета склонений небесных тел в экваториальных системах звездных (небесных) координат.

Кульминация светил — явление прохождения светилом при видимом (виртуальном) суточном движении звезд небесного меридиана. Геометрически различают *верхнюю* и *нижнюю кульминацию*. Под *верхней кульминацией* понимают верхнюю точку (ближе к Северному полюсу) пересечения суточной параллели светила и небесного меридиана. Нижнюю точку пересечения соответственно называют *нижней кульминацией*.

Линия узлов орбиты спутника — линия пересечения орбитальной плоскости спутника с небесным экватором.

Меридиан небесный — большой круг небесной сферы, проходящий через ось мира и отвесную линию точки наблюдений.

Метаданные — всеобъемлющие данные в электронном виде об описываемом объекте при создании цифровых карт. Основные разделы метаданных следующие: общие служебные данные; географическая, геодезическая, картографическая и специальная информация.

Модуляция частот (электромагнитных волн) — изменение одного из параметров (фазы, частоты, амплитуды и др.) гармонических колебаний электромагнитных волн по определенному закону с целью формирования кодированных сигналов для передачи информации.

Мультимедиа — комплекс аппаратных и программных средств, позволяющих работать пользователю с ЭВМ (в т. ч. и с ПЭВМ) в диалоговом режиме с разнородными данными, а именно: текстом, графикой, видео, звуком. Мультимедиа можно

представить в линейной (пассивной) и интерактивной форме. В первом случае пользователь лишен возможности управлять тем, что представлено ему на экране монитора. Он может лишь пассивно просматривать текстовые и графические документы. Во втором случае пользователю представлена возможность выбора и управления. Он может внести изменения в интересующий его документ, запросить дополнительную информацию, вновь возвратиться к просмотренному материалу. Мультимедиа включают аудио- и видеосредства ПЭВМ и серверов.

Небесная сфера — вспомогательная виртуальная сфера радиуса r , на которую проектируют объекты (небесные тела, наземные пункты и др.). Величине r могут придаваться различные значения. Она может быть равна бесконечности, единице, среднему радиусу Земли и др.

Центр небесной сферы в общем случае может находиться в любой точке пространства: в центре масс Земли, в любой точке физической поверхности Земли, в центре масс Луны, Солнца, планет, центре масс Солнечной системы. В связи со сказанным, будем иметь следующие небесные сферы: геоцентрическую, топоцентрическую, селеноцентрическую, гелиоцентрическую, ареоцентрическую (центр сферы расположен в центре масс Марса), барицентрическую (центр сферы находится около Солнца — в центре масс Солнечной системы).

Небесная сфера ориентируется по оси мира, совпадающей или параллельной оси вращения Земли. Ось мира проходит через центр небесной сферы. Как производный элемент, небесный экватор, проведенный через центр небесной сферы перпендикулярно оси мира, формирует небесную сферу как геометрическую фигуру для решения многих астрономических, геодезических, картографических и других задач.

Определения других элементов небесной сферы (небесного меридиана, небесного горизонта, привязанного к отвесной линии и геоиду, круга склонений и круга высот (вертикала)) приведены в глоссарии отдельными пунктами.

Несущие частоты — рабочие частоты, формируемые синтезаторами посредством умножения частоты опорного генератора. В GPS для формирования несущих частот L_1 и L_2 опорная частота, равная 10,23 МГц (мегагерц, 1 МГц = 10^6 Гц), умножается соответственно на 154 и на 120. Получаемые при этом частоты $L_1 = 1575,42$ МГц и $L_2 = 1227,60$ МГц соответствуют дециметровому диапазону радиоволн: $\lambda_1 = 19,0$ см; $\lambda_2 = 24,4$ см. В GPS на всех спутниках (24 основных и 3-х резервных, обращающихся на расстоянии от поверхности общеземного мирового эллипсоида на высоте 20 145 км) вырабатываются одинаковые вышеназванные частоты L_1 и L_2 .

В ГЛОНАСС соответствующими синтезаторами для каждого спутника вырабатывается своя пара несущих частот. Одни из них занимают полосу частот, пределом которых является частота L_1 , другая охватывает диапазон частот, пределом которых является частота L_2 . Высота орбит спутников ГЛОНАСС равна 19 100 км.

Кроме несущих, на спутниках также на основе использования опорного генератора формируются *тактовые частоты*, используемые для образования *кодовых сигналов*. В GPS *кодовыми сигналами* являются С/А-код с частотой $f_c = 1,023$ МГц и Р-код с частотой $f_p = 10,23$ МГц. В ГЛОНАСС используют такие тактовые частоты: для СТ-кода $f_{СТ} = 0,511$ МГц; для ВТ-кода $f_{ВТ} = 5,11$ МГц.

Сформированные кодовые сигналы (на спутниках), содержащие информацию об эфемеридах спутника, шкале времени, альманах и другие сведения, накладываются на несущие частоты и передаются потребителям на спутниковые приемники.

Нормальная высота — расстояние по вертикали от точек физической поверхности Земли до поверхности квазигеоида. Нормальные высоты (численное значение высоты принято называть *отметкой*) могут быть определены, в основном, двумя путями.

В первом случае отметки точек (пунктов) земной поверхности получают по результатам геометрического нивелирования, выполненного по программе I, II, III и IV-го классов и нормам технического нивелирования. При этом, в результаты нивелирования I и II классов, а в горных районах и III-го класса вводят поправки за уклонение отвесных линий от нормалей к поверхности отсчетного земного эллипсоида.

Во втором случае сначала определяют геодезические высоты (расстояния от точек земной поверхности до поверхности отсчетного земного эллипсоида по нормам к нему) по результатам спутниковых наблюдений, а затем вычисляют нормальные высоты, как разность геодезических высот и высот квазигеоида над отсчетным земным эллипсоидом.

Высоты квазигеоида над отсчетным земным эллипсоидом, часто называемые в сокращенном виде *высотами квазигеоида*, определяют по результатам гравиметрических или астрономо-геодезических измерений.

Нормаль к эллипсоиду — перпендикуляр к поверхности отсчетного земного эллипсоида (общеземного или референцного), проектирующий точку физической поверхности Земли на поверхность эллипсоида.

Отвесная линия — линия, перпендикулярная к уровенной поверхности (геоиду), строится нитью нитяного отвеса. В астрономо-геодезических приборах устанавливается горизонтальная плоскость, перпендикулярная отвесной линии, при помощи уровней. Круглый уровень позволяет устанавливать горизонтальную плоскость приближенно, а цилиндрический — точно. Именно с отвесной линией и горизонтальной плоскостью связаны все астрономические и геодезические измерения: измерения углов, расстояний и превышений.

Параллель — малый круг, параллельный экватору (небесному или земному).

Перигей орбиты спутника — точка орбиты (близкой к круговой, но имеющей форму эллипса с небольшим эксцентриситетом около 0,001), ближайшая к Земле.

Перигелий — ближайшая к Солнцу точка орбиты Земли или другого небесного тела, движущегося вокруг Солнца по эллипсу.

Прямое восхождение светила — одна из компонент экваториальных систем небесных координат (2-й системы); угол, отсчитываемый по дуге небесного экватора от начального круга склонений против хода часовой стрелки до круга склонений светила в пределах от 0° до 360° . Прямое восхождение может быть выражено в часовой мере в пределах от 0^h до 24^h .

Псевдодальность — измеренное косвенным методом расстояние между спутником и наземным пунктом.

Синхронизация часов спутника и спутникового приемника — технология определения поправок в показания часов приемника. При определении местоположения наземного (или находящегося в пространстве, например, в самолете) пункта методом пространственной засечки с контролем необходимо определить дальности до четырех спутников. На один и тот же момент времени (эпоху). В действительности измеряют псевдодальности.

Система координат ПЗ-90 (параметры Земли, определенные на 1990 г.) — геоцентрическая пространственная прямоугольная система координат с началом в центре масс Земли. Ориентировка системы ПЗ-90 выполнена следующим образом: ось Z направлена по малой полярной (вблизи Полярной звезды) полуоси отсчетного общеземного (мирового) эллипсоида; ось X направлена из центра масс Земли в точку пересечения земного экватора с Гринвичским меридианом; ось Y дополняет систему до первой — ось Y находится правее оси X , если смотреть с острия оси X . С 1 января 2014 г. введена общеземная (мировая) геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11), по наблюдениям 1990-2011 гг. при эксплуатации ГЛОНАСС с ориентацией осей X , Y и Z по принципу системы координат ПЗ-90.

Отсчетным земным эллипсоидом, к которому отнесена система координат ПЗ-90, является абсолютный (общеземной) эллипсоид с

большой полуосью, равной 6 378 136 м, и полярным сжатием, равным 1:298,257839. Отсчетным эллипсоидом для системы координат ПЗ-90.11 является общий земной эллипсоид с началом координат в центре масс Земли и аппликатой Z , совпадающей с малой осью эллипсоида (вращающегося эллипса).

Параметры эллипсоида ПЗ-90.11 практически совпадают с их значениями для эллипсоида ПЗ-90 и равны: $a = 6378136$ м, $\alpha = 1:298,25784$.

При определении a и α приняты следующие фундаментальные геодезические постоянные: геоцентрическая гравитационная Земли $f_M = 398600,4418$ км³/с²; угловая скорость вращения Земли $\omega = 7,292119 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

Система координат WGS-84 — геоцентрическая пространственная прямоугольная система координат, отнесенная к абсолютному (общеземному) эллипсоиду с параметрами: большой полуосью, равной 6 378 137 м, полярным сжатием, равным 1:298,257223.

Схема расположения и ориентации координатных осей сходна с системой координат ПЗ-90.

Система координат WGS-84 разработана специалистами США и используется при обработке спутниковых наблюдений GPS.

Между системами координат ПЗ-90 и WGS-84 имеются *три различия*: начала координат смещены относительно друг друга на величину порядка 1 м; координатные оси Z развернуты на малый угол, равный 0,16 секунды; линейные масштабы систем различаются на величину, равную 0,12.

Разработаны алгоритмы перехода системы координат ПЗ-90 к системе WGS-84 и обратно.

Системы координат СК-95 и ГСК-2011 являются государственными (РФ). СК-95 введена в 2000 г. Постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 и представлена в четырех подсистемах: *геоцентрические прямоугольные координаты* X' , Y' , Z' на эллипсоиде Красовского с параметрами $a = 6378135$ м, $\alpha = 1:298,3$ с началом координат, смещенным от положения центра масс Земли, принятого в ПЗ-90 на величину порядка 100 м, оси X' ,

Y' , Z' параллельны осям X , Y , Z в ПЗ-90; геоцентрическая широта B , геодезическая долгота L и геодезическая высота H_G , отнесенные к поверхности эллипсоида Красовского; значение прямоугольных плоских координат X и Y в проекции Гаусса-Крюгера; нормальные высоты H , отсчитанные от поверхности квазигеоида до точек поверхности Земли по отвесным линиям. СК-95 будет применяться до 1 января 2017 г. наряду с СК-42.

ГСК-2011 — государственная система координат введена в действие тем же Постановлением Правительства РФ № 1463 с 28 декабря 2012 г. Она относится к общеземному эллипсоиду с параметрами $a = 6378136,5$ м, $\alpha = 1:298,2564151$, полученными по следующим значениям фундаментальных геодезических постоянных: $f_M = 398600,4415$ км³/с²; $\omega = 7,292115 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

Склонение светила — одна из компонент экваториальных систем небесных координат; угол, отсчитываемый по дуге круга склонений от небесного экватора (в обе стороны от него) до направления из центра небесной сферы на светило в пределах от 0° до 90° .

Точка весеннего равноденствия — точка пересечения небесного экватора с орбитой Земли, введена для ориентировки инерциальной системы небесных координат, в частности, 2-й экваториальной.

Фундаментальные постоянные — физические величины, использованные при вычислении параметров мировых систем координат ПЗ-90 и WGS-84. Ими являются: скорость света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с; геоцентрическая гравитационная постоянная $f_M = 39860044,18 \cdot 10^7$ м³/с²; угловая скорость вращения Земли $\omega = 7292115 \cdot 10^{-11}$ рад/с.

Часовой угол — сферический угол по дуге небесного экватора, отсчитанный от Гринвичского меридиана по ходу часовой стрелки до круга склонений небесного тела в пределах от 0^h до 24^h , или от 0° до 360° , или от меридиана любой точки местности M . Часовой

угол t_γ , точки весеннего равноденствия, отсчитанный от меридиана точки M , есть местное звездное время s .

Чип (Chip) — элементарная посылка. Это сигнал ЭМВ (электромагнитных волн) нулевого или единичного уровня в бинарном импульсном коде-варианте последовательности нулей и единиц. Число чипов в секунде называется *частотой чипов*.

Широта астрономическая — компонента астрономических сферических координат (астрономических широт и долгот) — угол между отвесной линией в точке наблюдений на земной поверхности и плоскостью небесного экватора. Широта отсчитывается в обе стороны от экватора в пределах от 0° до 90° . Различают северные и южные широты по полушариям Земли.

Под *плоскостью астрономического меридиана* понимается плоскость, проходящая через отвесную линию точки наблюдений, и параллельная оси мира.

Широта геодезическая — компонента геодезических (эллипсоидальных) координат (геодезических широт и долгот) — угол между нормалью к поверхности отсчетного эллипсоида и плоскостью земного экватора.

Эклиптика — большой круг небесной сферы, являющийся проекцией орбиты Земли при ее обращении вокруг Солнца.

Эпоха — фиксированный момент свершения события от принятого начала счета времени.

Эфемериды спутника — рассчитанные в инерциальной системе координат на заданную эпоху координаты спутника (любого небесного тела).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография: в 2 т. Т. 1 / К. М. Антонович. М. : ФГУП Картогеоцентр, 2005. — 334 с.
2. Астрономический ежегодник на 1994 год : в 2 т. Т. 1 / АН РФ. — Л. : Наука, Ленинград. отделение, 1993. — 352 с.
3. Базлов, Ю. А. Параметры связи систем координат / Ю. А. Базлов [и др.] // Геодезия и картография. — 1996. — № 8. — С. 6-7.
4. Баландин, В. Н. Спутниковые и традиционные геодезические измерения / В. Н. Баландин [и др.]. — СПб. : ФГУП Аэрогеодезия, 2003. — 112 с.
5. Баранов, В. Н. Космическая геодезия : учебник / В. Н. Баранов, Е. Г. Бойко, И. И. Краснорылов. — М. : Недра, 1986. — 408 с.
6. Батраков, Ю. Г. Сети специального назначения : монография / Ю. Г. Батраков. — М. : Картогеоцентр-Геодезиздат, 1999. — 406 с.
7. Берк, В. И. О современных геоцентрических системах координат / В. И. Берк // Геодезия и картография. — 2005. — № 2. — С. 4-11.
8. Берлянт, А. М. Картография : учебник / А. М. Берлянт. — М. : КДУ, 2010. — 328 с.
9. Бойко, Е. Г. Сфероидическая геодезия : учебник / Е. Г. Бойко. — М. : Картогеоцентр-Геодезиздат, 2003. — 144 с.
10. Бородко, А. В. Развитие систем геодезического обеспечения в современных условиях / А. В. Бородко, Н. Л. Макаренко, Г. В. Демьянов // Геодезия и картография. — 2003. — № 10. — С. 7-13.
11. Галазин, В. Ф. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90) / В. Ф. Галазин, Б. Л. Каплан, М. Г. Лебедев / под общ. ред. В. В. Хвостова. — М. : Координат. Научно-информационный Центр ВТС России, 1998. — 38 с.
12. Генике, А. А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. — М. : Картогеоцентр, 2004. — 354 с.
13. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейс. Контр. док. (редакция 5.0). [Электронный ресурс]. — М. : Коринац. научно-информац. центр ВТС России, 2002. — 58 с. Режим доступа: <http://www/glonass-center.ru>.
14. Глушков, В. В. Космическая геодезия: методы и перспективы развития / В. В. Глушков, К. К. Насретдинов, А. А. Шаравин. — М. : Ин-т полит. и воен. анализа, 2002. — 448 с.
15. ГОСТ Р 51794-2001. Аппаратура радионавигационная глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позициони-

- рования. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек. — Введ. 9 августа 2001 г. — М. : Изд-во стандартов РФ, 2001. — 12 с.
16. ГОСТ 28441-99. Картография цифровая. Термины и определения. — Введ. 1 июля 2000. — Минск : Изд-во Межгосударственный стандарт, 2000. — 8 с.
 17. ГОСТ Р 51833-2001. Фотограмметрия. Термины и определения. — Введ. 1 июля 2001. — М. : Изд-во стандартов РФ, 2002. — 11 с.
 18. Демьянов, Г. В. Концепция современного развития систем нормальных высот / Г. В. Демьянов // Изд. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2003. — № 3. — С. 3-20.
 19. Инструкция по нивелированию 1, 2, 3 и 4 классов / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2004. — 228 с.
 20. Инструкция по построению государственной геодезической спутниковой сети / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2002. — 260 с.
 21. Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2004. — 218 с.
 22. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2002. — 160 с.
 23. Жуков, А. В. Практикум по спутниковому позиционированию : учеб. пособие / А. В. Жуков, Б. Б. Серапинас. — М. : МГУ, 2002. — 120 с.
 24. Карпик, А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий : монография / А. П. Карпик. — Новосибирск : СГГА, 2004. — 260 с.
 25. Ключин, Е. Б. Лекции по физике, прочитанные самому себе : монография / Е. Б. Ключин. — М. : Бумажная галерея, 2005. — 336 с.
 26. Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований : учебник / Ю. Ф. Книжников. — М. : Академия, 2011. — 410 с.
 27. Кравцова, В. И. Космические методы картографирования: монография / В. И. Кравцова. — М. : КолосС, 2000. — 238 с.
 28. Куштин, И. Ф. Геодезия: учеб.-практ. пособие / И. Ф. Куштин, В. И. Куштин. — Ростов н/Д: Феникс, 2009. — 909 с.
 29. Макаренко, Н. Л. Система координат СК-95 и пути дальнейшего развития государственной геодезической сети / Н. Л. Макаренко, Г. В. Демьянов // Информац. бюллетень ГИС-Ассоциации, 2002. — № 1. — С. 59-60.
 30. Молоденский, М. С. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли / М. С. Молоденский, В. Ф. Ефремов, М. И. Юркина // Тр. ЦНИИГАиК. Вып. 131. — М. : Недра, 1960. — 252 с.

31. Мориц, Г. Вращение Земли / Г. Мориц, А. Мюллер / пер. с англ. — Киев : Наукова Думка, 1995. — 512 с.
32. Неумывакин, Ю. К. Земельно-кадастровые геодезические работы : учебник / Ю. К. Неумывакин, М. И. Перский. — М. : КолосС, 2005. — 184 с.
33. Николаев, А. Ф. Системы координат и счета времени, используемые в картографо-геодезическом производстве и кадастре земель : учеб.-справочное пособие / А. Ф. Николаев. — Тюмень : Тюменская сельхозакадемия, 2008. — 94 с.
34. О единых государственных системах координат [Электронный ресурс] : Постановление Правительства РФ от 28.12.2012 № 1463. Доступ из СПС «Консультант Плюс».
35. Основные положения о государственной геодезической сети РФ / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2004. — 28 с.
36. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90). — М. : Координационный научно-информационный центр, 1998. — 36 с.
37. Параметры общего земного эллипсоида и гравитационного поля Земли (Параметры Земли 1990 года) / ВТУ ГШ. — М. : РИО ВТУ ГШ, 1991. — 68 с.
38. Плахов, Ю. В. Геодезическая астрономия: учебник / Ю. В. Плахов, И. И. Красноралов. — М. : Картгеоцентр-Геодезиздат, 2002. — 390 с.
39. РТМ 06-180-84. Руководящий технический материал по сбору и оформлению данных об измерениях, выполненных в астрономо-геодезической сети СССР / ГУГК. — М. : ЦНИИГАиК, 1984. — 40 с.
40. РТМ 68-14-01. Спутниковая технология геодезических работ: Термины и определения / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2001. — 28 с.
41. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95) / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2004. — 142 с.
42. Руководство по размещению результатов спутниковых и традиционных измерений в государственной геодезической сети РФ в файлах унифицированного формата (измерения и дополнения к РТМ 06-180-84) / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2003. — 20 с.
43. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2003. — 182 с.
44. Савиных, В. П. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В. П. Савиных, В. Я. Цветков. — М. : Картгеоцентр-Геодезиздат, 2001. — 228 с.
45. Салищев, К. А. Картоведение : учебник / К. А. Салищев. — М. : Изд-во МГУ, 1990. — 400 с.
46. Серапинас, Б. Б. Глобальные системы позиционирования : учеб. пособие / Б. Б. Серапинас. — М. : Каталог, 2002. — 106 с.

47. Серапинас, Б. Б. Математическая картография : учебник / Б. Б. Серапинас. — М. : Академия, 2005. — 335 с.
48. Создание единой геодезической основы Европы : Обзорная информация / Роскартография. — М. : ЦНИИГАиК, 2003. — 104 с.
49. Соловьев, М. Д. Математическая картография : учебник / М. Д. Соловьев. — М. : Недра, 1969. — 288 с.
50. Справочник геодезиста / под ред. В. Д. Большакова. — М. : Недра, 1966. — 990 с.
51. Толчельникова, С. А. Международная опорная система координат ICRS и революции в астрономии / С. А. Толчельникова // Геодезия и картография. — 2002. — № 9. — С. 13-20.
52. Юркина, М. И. Действующие системы координат в России / М. И. Юркина, Л. И. Серебрякова // Изд. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2001. — № 3. — С. 40-53.
53. Юркина, М. И. Общеземная система высот и морская поверхность / М. И. Юркина // Научн.-техн. сб. по геодезии, аэро-космосъемкам и картографии. — М. : ЦНИИГАиК, 1996. — С. 46-65.
54. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский [и др.]. — М. : ОНИКС, 2006. — 1056 с.
55. Hoffmann, Wellenhot. GPS. Theory and Practice. — Wien: New-York, 1992. — 306 p.
56. IERS Technical Note No.32. IERS Conventions. [Electronic resource] / D. Macarthy and G. Petit. — Режим доступа: <ftp://maia.usno.navy.mil/conv2000>.
57. Leick, A. GPS Satellite Surveying /A. Leick. — New-York: A. Willey Interscience Publication, 1995. — 560 p.
58. Seeger, H. EUREF — 10 Jahre Aufbauarblit an neuen geode — tischen Bezugssystem fur Europe / H. Seeger, Y. Alfmer, G. Engelhard. — Frankfurt am Main: 1998. — 42 s.
59. Snay, R. A. Modern Terrestrial Reference System. WGS and ITRS / R. A. Snay, T. Soller. — March: 2000. — 246 p.
60. Soller, T. A note frame transformation with applications to geodetic datums / T. Soller, J. Marshall // GPS Solutions. — 2003. — No 1. — P. 23-32.
61. Проект Приказа Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии «Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года» (подготовлен Росреестром 18.01.2016).
62. РД 50-25645.325-89. Методические указания. Спутники Земли искусственные. Основные системы координат для баллистического обеспечения полетов и методика расчета звездного времени.

Учебное электронное издание

ИДРИСОВ Ильдар Рустамович
НИКОЛАЕВ Альберт Феоктистович
НИКОЛАЕВА Светлана Сергеевна

МИРОВЫЕ И ГОСУДАРСТВЕННЫЕ
СИСТЕМЫ КООРДИНАТ И СЧЕТА ВРЕМЕНИ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ГЕОГРАФИИ, ГЕОДЕЗИИ
И КАРТОГРАФИИ

Учебно-справочное пособие

Редактор
Компьютерная верстка

*Ю. Ф. Евстигнеева
С. Ф. Обрядова*



Подготовлено к электронному изданию 12.12.2016.
Объем 7,0 усл. п. л. Формат 60×84/16. Заказ 1082.

Издательство Тюменского государственного университета
625003, г. Тюмень, ул. Семакова, 10
Тел./факс: (3452) 59-74-68; 59-74-81
E-mail: izdatelstvo@utmn.ru