

Предисловие	9
Введение	13
0.1. Основные задачи, решаемые сферической астрономией	13
0.2. Краткий исторический обзор	21
Глава 1. Основы сферической геометрии	39
1.1. Основные понятия	39
1.2. Скаляры, векторы, тензоры и системы координат	44
1.3. Сферическая система координат	56
1.4. Основные формулы сферической геометрии	63
Глава 2. Астрономические системы координат	70
2.1. Горизонтальная система координат	72
2.2. Экваториальная система координат	74
2.3. Эклиптическая система координат	79
2.4. Галактическая система координат	80
2.5. Преобразование координат из одной системы в другую	83
2.6. Суточное вращение небесной сферы	94
2.7. Восход и заход небесных тел	96
2.8. Определение систем координат в современной астрометрии	97
2.9. Эпоха каталога, эпоха равноденствия, динамическое равноденствие	101

2.10. Основы небесной механики	106
2.10.1. Законы Кеплера	106
2.10.2. Параметры и аномалии кеплеровской орбиты	116
2.11. Барицентрическая система координат	123
Глава 3. Системы координат на Земле	126
3.1. Основные параметры Земли	128
3.2. Уравнение геоида	133
3.3. Геоцентрическая и геодезическая системы координат	142
3.4. Земная система координат	152
3.5. Приливы и определение земной системы координат	159
Глава 4. Шкалы времени	163
4.1. Солнечное время	165
4.1.1. Системы всемирного времени и неравномерность вращения Земли	170
4.1.2. Всемирное координированное время UTC	178
4.1.3. Местное, поясное и декретное время	184
4.2. Звездное время	186
4.3. Эфемеридное время	188
4.4. Атомное время	189
4.5. Динамические шкалы времени	198
4.5.1. Координатное и собственное время	200
4.5.2. Связь между динамическими шкалами времени	209
4.5.3. Барицентрическая и геоцентрическая небесные системы отсчета	220
4.6. Пульсарная шкала времени	227
4.7. Системы счета дней	234
4.7.1. Юлианские даты и юлианская эпоха	234
4.7.2. Тропический и звездный год	236
4.8. Летосчисление	239
4.9. Связь всемирного и звездного времени	245
Глава 5. Эффекты, искажающие положение звезд на небесной сфере	251

5.1.	Рефракция	251
5.1.1.	Учет рефракции в оптическом диапазоне	252
5.1.2.	Формула Лапласа для вычисления рефракции	258
5.1.3.	Восход и заход светил с учетом рефракции	262
5.1.4.	Влияние рефракции на прямое восхождение и склонение звезды	263
5.1.5.	Рефракция при наблюдениях в радиодиапазоне	265
5.1.6.	Рефракция и задержка радиосигнала в тропосфере	277
5.1.7.	Задержка оптического сигнала в тропосфере	296
5.2.	Аберрация	297
5.2.1.	Изменение координат звезды из-за рефракции или аберрации	301
5.2.2.	Суточная аберрация	304
5.2.3.	Формулы учета годичной аберрации низкой точности	305
5.2.4.	Точные формулы учета годичной аберрации	308
5.2.5.	Планетная аберрация	315
5.3.	Параллакс	317
5.3.1.	Оценка расстояния до звезд Ньютоном	319
5.3.2.	Изменение координат звезды из-за параллактического смещения	320
5.3.3.	Суточный параллакс	321
5.3.4.	Суточный параллакс Солнца	323
5.3.5.	Влияние суточного параллакса на экваториальные координаты	325
5.4.	Собственное движение звезд	326
5.5.	Измерение параллаксов и собственных движений звезд	333
5.6.	Отклонение луча света в гравитационном поле	334
5.7.	Изменение координат опорного источника в поле Солнца	339
Глава 6.	Прецессия и нутация	349
6.1.	Причины прецессии и нутации	351

6.2.	Определение матрицы прецессии	359
6.3.	Прецессионные параметры в теории IAU2000	365
6.4.	Математическое описание прецессии	366
6.5.	Точные формулы учета нутации	375
6.6.	Преобразование из земной к небесной системе координат	379
6.6.1.	Определение небесного эфемеридного полюса .	380
6.6.2.	Гринвичское истинное звездное время	385
6.6.3.	Классическое преобразование из ЗСК в НСК . .	388
6.6.4.	Концепция «невращающегося начала отсчета» .	390
6.7.	Процедура редукции оптических наблюдений	402
Глава 7.	Редукция наблюдений на РСДБ	407
7.1.	Основные этапы редукции наблюдений на РСДБ	411
7.2.	Вычисление гравитационной задержки	412
7.3.	Вычисление геометрической задержки	415
7.4.	Вычисление частных производных по нутации	421
Глава 8.	Астрономические постоянные	424
Приложение А.	Юлианские и календарные даты	435
Приложение В.	Резолюции XXVI Генеральной Ассамблеи МАС	439
Приложение С.	Основные математические определения	443
С.1.	Матричная алгебра	443
С.2.	Линейная алгебра	445
С.3.	Декартовы прямоугольные и сферические координаты вектора	446
С.4.	Элементы дифференциального и интегрального исчисления	447
С.5.	Криволинейные координаты	449
С.6.	Сферические функции	451
Приложение Д.	Основные термины	454
Литература		469
Предметный указатель		473

Астрометрия — это область астрономии, занимающаяся установлением системы координат на небесной сфере. Ее раздел — сферическая астрономия, одной из задач которой является строгое математическое определение этой системы. В последние два десятилетия XX века в развитии астрометрии наступил новый этап. В связи с появлением и использованием в астрометрии новых инструментов, таких как радиоинтерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ), дальнометры для лазерной локации Луны и спутников, космический телескоп ГИППАРКОС, а также развитием космических навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, точность получаемых астрометрических данных повысилась на три порядка. Для корректной обработки результатов наблюдений (редукции) были разработаны новые алгоритмы, ориентированные на использование компьютеров. В связи с ростом точности при обработке наблюдений учитываются эффекты общей теории относительности (ОТО), используются точные формулы прецессии, нутации, абберации и других эффектов.

В отличие от традиционного подхода, в котором использовался аппарат сферической тригонометрии, все новые алгоритмы редукции астрометрических наблюдений построены на основе векторного и тензорного исчисления с применением матричной алгебры, чтобы в максимальной степени оптимизировать время вычислений и экономить машинную память. Автор старался использовать стандартные (принятые или рекомендованные Международным астрономическим союзом) определения величин.

Увеличение точности наблюдений, широкое использование радиоинтерферометров и космических навигационных систем для ре-

шения задач астрометрии и геодинамики, повсеместное применение компьютеров для обработки данных требуют изменения содержания курса «Сферическая астрономия». Несмотря на то, что решение задач сферической астрономии выполняется на основе методов матричной и векторной алгебры, автор предпочел сохранить традиционное название «Сферическая астрономия».

Трудность создания нового курса заключается в сложности современных алгоритмов редукции наблюдений и необходимости доступного для студентов изложения. «Сферическая астрономия» читается в МГУ им. М. В. Ломоносова для студентов первого курса, когда общая подготовка по математике и физике еще не завершена. Поэтому некоторые вопросы приходится излагать без строгих доказательств. Это касается, главным образом, решений задач в рамках специальной и общей теории относительности. Строгие решения можно найти в учебнике М. В. Сажина «Общая теория относительности для астрономов».

В учебнике последовательно изложены основы фундаментальной астрономии, целью которой является определение инерциальной системы координат в пространстве — основы для изучения Вселенной. Для этого формулируется рекомендуемый Международным Астрономическим Союзом (МАС) математический аппарат интерпретации и анализа астрометрических наблюдений. Поэтому учебник, по мнению автора, может быть использован как справочник рекомендованных МАС и Международной службой вращения Земли и систем отсчета (МСВЗ) формул редукции оптических и радионаблюдений (см. IERS Conventions (2003), которые в тексте называются как «Стандарты МСВЗ»).

В соответствии с основными задачами сферической астрономии содержание учебника следующее.

Первая часть посвящена определению систем координат на небесной сфере и преобразованию координат вектора из одной системы в другую с использованием как формул сферической тригонометрии, так и матриц вращения.

Во второй части рассматриваются различные шкалы времени, используемые в современной астрономии. Координаты небесных объектов меняются со временем из-за различных причин. Поэтому для изучения их движения необходимо задать единицы измерения времени и, кроме того, определить промежуток времени между на-

блюдениями. Принципы исчисления времени также рассматриваются во второй части. Определяются понятия: юлианская дата, юлианский год, эпоха каталога, эпоха равноденствия, стандартная эпоха, даются основы построения календаря. Здесь же рассматриваются причины неравномерности шкалы всемирного времени, связанные с неравномерностью вращения Земли.

Третья часть учебника посвящена определению топоцентрической, геоцентрической, гелиоцентрической и барицентрической систем координат. Особое внимание уделяется определению земной системы координат на основе современных наблюдений на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами и с помощью космических навигационных систем. Определяются геодезические, геоцентрические и астрономические координаты и устанавливается связь между ними.

В четвертой части рассматриваются явления рефракции, аберрации, причины параллактического смещения небесных объектов. В связи с широким использованием в настоящее время наблюдений в радиодиапазоне подробно рассматривается вопрос о радио-рефракции. В отличие от прежних курсов по сферической астрономии, в данной части приводятся формулы точного учета аберрации и параллактического смещения. После исправления координат объекта из-за влияния рефракции, аберрации и параллакса получают его координаты, относящиеся к истинному экватору и равноденствию даты. Это означает, что положение небесного экватора и точки весеннего равноденствия вычисляются на момент наблюдения. Исправление наблюдаемых координат объекта (введение поправок за рефракцию, аберрацию и параллакс) т. е. приведение их к барицентрической системе отсчета является одним из этапов редукции. Учет нутации Земли позволяет определить координаты, отнесенные к среднему экватору и равноденствию даты.

Учет собственного движения небесного объекта и прецессии земной оси в пространстве позволяет преобразовать координаты объекта к системе, связанной со средним экватором и равноденствием стандартной эпохи. Положение небесных тел в этой системе координат является средним стандартным местом.

Основы теории прецессии и нутации даются в пятой части учебника. Здесь также рассматривается преобразование координат из-за этих явлений от одного равноденствия к другому.

В связи с широким использованием РСДБ в астрометрии в шестой части учебника кратко излагаются основы радионаблюдений и принципы обработки наблюдений. Также рассматриваются основы метода РСДБ, дается характеристика небесной и земной систем координат, которые задаются координатами радиоисточников и радиотелескопов, соответственно. Рассматриваются также особенности редукации наблюдений на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами. Обсуждаются проблемы, связанные со стабильностью реализованной и будущей небесных систем координат.

В приложениях приводятся определения основных астрометрических и математических терминов.

Автор выражает глубокую признательность К. В. Куимову, который прочитал рукопись и дал ценные советы и рекомендации, а также благодарит М. В. Сажина и О. А. Титова, обсуждения с которыми помогли значительно улучшить изложение материала, В. Н. Семенова за помощь при редактировании текста.

Автор надеется, что предлагаемый учебник окажется полезным не только студентам-астрономам, но и студентам и аспирантам смежных с астрономией наук, и будет рад, если он поможет правильному пониманию основ сферической астрономии и астрометрии коллегами-астрофизиками.

Автор благодарен РФФИ за поддержку (гранты 01-02-16529, 02-05-39004, 05-02-17091). Полученные результаты частично были использованы при подготовке учебника.

ГАИШ МГУ
2002–2005

В. Е. Жаров

Звуча в гармонии вселенной
И в хоре сфер гремя, как гром,
Златое солнце неизменно
Течет предписанным путем.
Непостижимость мироздания
Дает нам веру и оплот,
И, словно в первый день создания,
Торжественен вселенной ход!

И. В. Гете «Фауст»

0.1. Основные задачи, решаемые сферической астрономией

За тридцать лет, прошедших после выхода прекрасного учебника профессора МГУ К. А. Куликова «Курс сферической астрономии», астрометрия изменилась коренным образом. Точность позиционных наблюдений возросла примерно в тысячу раз. Такой прогресс обусловлен вводом в строй и непрерывным совершенствованием радиointерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ), инструментов для лазерной локации Луны и спутников, вводом в действие систем глобального определения местоположения (GPS и ГЛОНАСС), разработкой специальных спутников для проведения астрометрических наблюдений, а также разработкой новых методов обработки результатов. Успешное завершение космического проекта HIPPARCOS (аббревиатура от английского High Precision PARallax Collecting Satellite или «спутник для высокоточного измерения параллаксов») позволило создать высокоточный каталог ~ 120000 звезд. Измерение параллаксов дало ценнейшую информацию о пространственном распределении этих звезд около Солнца не

только для астрометристов, но и для астрофизиков, специалистов по звездной динамике и небесной механике.

Каковы основные задачи астрометрии и сферической астрономии, о которой далее пойдет речь? Астрометрия является частью астрономии. Ее главной задачей является определение из наблюдений векторов положений и скоростей различных небесных тел, а также формы тел. Но положение или координаты тела могут быть определены лишь относительно другого тела или какой-то выбранной точки. В астрономии координаты измеряются в выбранной системе отсчета. Система отсчета (английский термин «reference system») — это условное понятие; на основе официальных соглашений определяются основные плоскости и точки, а также координатные оси системы. Ни оси, ни основные точки системы на небе не выделены. Поэтому в виде практической реализации системы отсчета («reference frame») принимается список координат и скоростей некоторого числа выбранных объектов (например, звезд или радиоисточников). Такой список называется *каталогом*. Отдельный каталог является одной из реализаций системы отсчета.

Таким образом, на основе наблюдений астрометрия определяет системы координат. Две таких системы имеют особую важность. Это небесная система координат, необходимая для определения движения небесных тел, и земная система координат, в которой измеряется положение наблюдателя. Желательно, чтобы небесная система координат была инерциальной. В этом случае уравнения движения записываются самым простым образом, т. к. в них отсутствуют силы инерции, обусловленные вращением системы отсчета.

Другой задачей астрометрии является определение моментов астрономических событий и промежутков времени между ними, т. е. определение и хранение времени.

Задачи, которые решает сферическая астрономия, связаны, главным образом, с математическими методами *редукции*¹ астрономических наблюдений.

Возникла сферическая астрономия в Древней Греции, хотя древнегреческие ученые многому научились у вавилонян. Это связано с необычайным расцветом математики в IV–II в. до н. э., и исполь-

¹Редукция наблюдений — приведение координат и скоростей небесных тел от системы координат, в которой они непосредственно измерены, к стандартной системе.

зованием греческими учеными математических методов в астрономии. Краткий исторический обзор развития сферической астрономии и астрометрии приводится ниже. Безусловно, обзор не является исчерпывающим, так как автор старался выделить лишь основные этапы в развитии этой науки.

Рассмотрим основные задачи, которые решаются сферической астрономией. Первой задачей, как уже говорилось, является *определение систем сферических координат*, тогда как задачей астрометрии является построение этих систем в виде каталогов звезд, радиоисточников и других небесных объектов. После того, как системы координат определены, второй задачей сферической астрономии является *вывод формул преобразования координат небесных тел из одной системы в другую*.

Положение небесных объектов непрерывно меняется с течением времени. Поэтому для изучения их движения необходимо определить *шкалу и единицу времени* для задания точного момента наблюдений и промежутка времени между наблюдениями. *Определение различных шкал времени* и установление связи между ними — это третья важнейшая задача сферической астрономии.

Уточним здесь, что мы понимаем под координатами небесного тела. Астрометрические инструменты используют свойства принимаемого электромагнитного излучения, испускаемого этим телом, для определения направления на него. Направление на источник излучения может быть указано как в декартовой (при предположении, что он находится на сфере единичного радиуса), так и в сферической системе координат. В дальнейшем эти координаты (прямоугольные или сферические) будем называть «видимыми».

Если наблюдения проводятся с поверхности Земли, то видимые координаты небесных тел искажаются из-за *рефракции* и *абберации*. Рефракцией называется искривление луча света от источника из-за преломления при прохождении земной атмосферы. Абберация — это изменение направления на объект в результате движения наблюдателя и конечности скорости света. Кроме этих эффектов мы должны описать изменения, происходящие с электромагнитными волнами при распространении внутри инструмента, и учесть их при редукции наблюдений. Это отдельная задача, которая решается перед проведением астрометрических наблюдений. Она связана с изучением инструмента и свойств приемника излучения и в данном учеб-

нике не рассматривается. Параметры инструмента и приемника могут быть получены в результате калибровки.

С другой стороны, положение самого небесного тела, например, в геоцентрической или барицентрической системе, может быть указано как в декартовой, так и в сферической системе. Изменение координат тела происходит из-за его *собственного движения в пространстве*. Кроме этого, при переходе от геоцентрической к барицентрической системе мы должны учесть перенос начала осей, что приводит к *параллактическому смещению*, а также поворот осей из-за прецессии, нутации и вращения Земли.

Учет рефракции, абберации, параллактического смещения и собственного движения является классической задачей сферической астрономии и частью редукции наблюдений.

Координаты объекта после учета рефракции, абберации и параллактического смещения относятся к системе координат, заданной на момент наблюдения, связанной с наблюдателем и называемой *топоцентрической*. Для разных наблюдателей положение осей этой системы будет различным относительно *земной системы координат*. В свою очередь, положение земной системы координат относительно *инерциальной системы координат* изменяется из-за *собственного вращения Земли, ее движения по орбите вокруг Солнца, прецессии и нутации*. Поэтому для преобразования координат объекта из системы, связанной с наблюдателем, сначала в земную систему координат, а затем в инерциальную систему, необходимо знать *фигуру Земли и параметры вращения Земли*.

Изучение вращения Земли — одна из важнейших задач астрометрии. В курсе «Сферической астрономии» мы лишь кратко коснемся этой проблемы, поскольку изучение вращения Земли необходимо для установления связи между земной и небесной системами координат. Без этой связи нельзя выполнить редукцию наблюдений. Кроме того, построение теории вращения Земли — это интересная задача на стыке многих наук: астрономии, механики, геофизики. В свою очередь, изучение фигуры Земли — это задача геодезии и гравиметрии. Заметим, что на современном этапе границы между этими науками практически стерлись. Измерение координат пункта с миллиметровой точностью невозможно без проведения гравиметрических измерений, без точного измерения и хранения времени в данном пункте.

Вращение Земли вокруг оси издавна принималось за основу счета времени. Сутки — одна из основных единиц счета времени и в природе, и в человеческой жизни. Лишь в середине XX века было доказано, что *продолжительность суток* (или угловая скорость вращения Земли вокруг оси) не остается постоянной. Значительно раньше (в конце XIX века) было обнаружено *движение полюсов*, т. е. изменение положения мгновенной оси вращения относительно главной оси инерции Земли.

Таким образом, вектор мгновенной угловой скорости вращения Земли, две компоненты x и y которого определяют положение полюса (или мгновенной оси вращения Земли), а третья — продолжительность суток, не остается постоянным ни по величине, ни по направлению. Три компоненты угловой скорости (или параметры вращения Земли — ПВЗ) не могут быть предсказаны с требуемой точностью на основе теории. Существует множество причин (в том числе и неизвестных), следствием которых являются вариации компонент угловой скорости. Изменения компонент довольно малы, но спектр очень сложен². К настоящему времени в спектре продолжительности суток обнаружены колебания с периодами от нескольких часов до полутора тысяч лет с амплитудами от 2–3 мкс до ~ 2 мс. Так как продолжительность суток примерно равна 86400 с, то максимальное относительное изменение скорости вращения Земли не превышает $\sim 2 \cdot 10^{-8}$. В спектре движения полюсов также найдены внутрисуточные и сезонные колебания с амплитудами от 10 до 50 мкс дуги (1 сек дуги = $1'' \approx 1$ радиан/206264, 80624709636). Наибольшую амплитуду ($\sim 0'',2$) имеет *чандлеровское колебание* с периодом $\sim 1,2$ года и годовое колебание с амплитудой $\sim 0'',1$. Полюс не отклоняется от главной оси инерции Земли более чем на 15 м.

Кроме периодических вариаций в скорости вращения Земли и в движении полюсов обнаружены вековые изменения: скорость вращения замедляется (продолжительность суток увеличивается), а полюс смещается относительно условного международного начала в направлении $\sim 75,7$ западной долготы.

²Сложные периодические сигналы, к которым относятся и параметры вращения Земли, можно представить в виде суммы гармонических колебаний с частотами, кратными основной частоте сигнала. Разложение сигнала на гармоники называется *гармоническим анализом*. В результате анализа определяется спектральная функция (*спектр сигнала*), которая содержит информацию об амплитудах и фазах отдельных гармоник.

Причинами неравномерности вращения Земли и движения полюсов являются внешние и внутренние процессы. К внешним процессам обычно относят приливное действие Луны и Солнца, а к внутренним — движения в атмосфере, в Мировом океане и в жидком ядре, а также перераспределение масс в коре и мантии.

Приливное воздействие Луны и Солнца приводит не только к изменению положения земного шара относительно вектора мгновенной угловой скорости, но и к изменению направления самого этого вектора в пространстве. Это явление называется *лунно-солнечной прецессией*. Причиной прецессии оси вращения является момент сил, возникающий из-за действия Луны, Солнца и планет на экваториальное утолщение Земли.

Прецессия изменяет со временем вид звездного неба. Амплитуда прецессии равна $\sim 23^\circ 5'$, а период — примерно 26000 лет. Кроме прецессионного смещения в пространстве, которое называют вековым из-за большого периода по сравнению с другими гармониками, ось вращения испытывает и периодические колебания (*нутацию*) с гармониками, основные из которых имеют периоды 13,7 суток, 27,6 суток, 6 месяцев, 1 год, 18,6 лет. Гармоника с периодом 18,6 лет имеет максимальную амплитуду ($\sim 9'' 2$). В результате нутации ось вращения описывает сложные петли в пространстве (рис. 1).

Разработка теории нутации Земли является одной из самых сложных задач астрометрии, геофизики и небесной механики. *Учет влияния прецессии и нутации* при вычислении взаимной ориентации земной и небесной систем координат является одной из задач сферической астрономии.

Необходимость рассмотрения теории вращения Земли в данном курсе связана также с определением *небесного эфемеридного* и *небесного промежуточного полюсов*, изучением суточных движений полюсов и их связи с нутационным движением оси вращения Земли. Движение полюсов согласно определению, принятому на XVII Генеральной Ассамблее ИАУ (Монреаль, 1979 г.), представляет движение небесного эфемеридного полюса, определенного с помощью принятой теории прецессии и нутации, по отношению к связанной с Землей координатной системе.

Теория нутации IAU1980 была рекомендована для использования во всех астрометрических вычислениях, начиная с 1984 г., и использовалась до 1 января 2003 г. С этого момента, согласно резо-

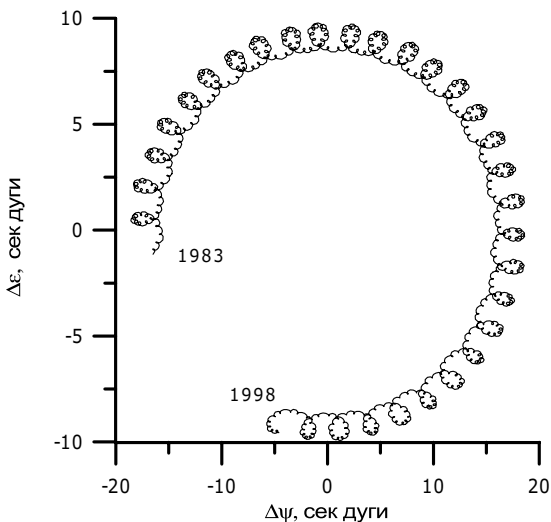


Рис. 1. Нутация оси Земли (без учета прецессионного движения) с 1983 по 1998 г. Нутационное движение разложено на две компоненты: $\Delta\psi$ —нутацию в долготе и $\Delta\varepsilon$ —нутацию в наклоне (обратите внимание, что оси имеют разный масштаб). Главная нутационная гармоника, имеющая период, равный 18,6 года, определяется поворотом плоскости лунной орбиты. Меньшие петли вызваны эллиптичностью орбит Луны и Земли, наклоном орбиты Луны к эклиптике и рядом других причин. Теория нутации Земли IAU1980 включает 106 гармоник нутационного движения с периодом от 18,6 лет до 4,7 суток и амплитудами от $\sim 9''/2$ до менее 1 мс дуги.

люции XXIV Генеральной Ассамблеи МАС (Бирмингем, 2000 г.), при редукции наблюдений должна использоваться новая теория нутации IAU2000. Эта теория включает примерно 1500 нутационных гармоник, и ошибка не превышает 0,2 мс дуги. В связи с переходом к новой теории нутации был определен *небесный промежуточный полюс*. Это было вызвано необходимостью разделения высокочастотных нутационных гармоник, которые вычисляются на основе теории, и высокочастотных гармоник в движении полюсов Земли, которые определяются на основе наблюдений.

Знание положения оси вращения в пространстве и в теле Земли необходимо для определения ориентации земной системы координат относительно небесной системы, которая с 1998 г. задается координатами ~ 600 внегалактических радиоисточников. Начало этой

системы помещается в центр масс (*барицентр*) Солнечной системы. Из-за большого расстояния до радиоисточников их видимое собственное движение относительно земного наблюдателя очень мало. Поэтому небесная система близка к инерциальной системе координат³. Реализацией земной системы координат являются геоцентрические прямоугольные координаты более чем 500 станций, расположенных в 290 пунктах наблюдений.

Земная и небесная системы координат являются основой для построения теории прецессии и нутации, изучения тектоники, деформаций земной коры, а также для решения задач космической геодезии и навигации. В связи с ростом точности решаемых в этих областях задач требуется создание инерциальной системы координат, направления осей которой должны быть определены с погрешностями не более 0,1 мс дуги, и земной системы координат с погрешностями взаимных положений пунктов не более 2–3 мм. Небесная и земная системы координат должны связываться новой теорией нутации и прецессии неупругой Земли, согласующейся с наблюдениями в пределах ± 1 мс дуги. Для решения этой задачи требуется также знать параметры вращения Земли, которые, как было сказано выше, не могут быть предсказаны с требуемой точностью. Поэтому для определения ПВЗ проводятся регулярные наблюдения звезд, радиоисточников, искусственных спутников Земли, Луны.

Подытожим сказанное. Накопление наших знаний о Земле отразилось в повышении точности определения астрономических постоянных, характеризующих Землю, ее вращение вокруг оси и обращение вокруг Солнца. Радиолокация планет позволила с высокой точностью определить величину астрономической единицы, которая является основной единицей расстояния в Солнечной системе. Измерения координат космических аппаратов, запущенных для исследования тел Солнечной системы, привели к уточнению масс планет. Эти данные привели к построению новой теории прецессии и нутации Земли. Разработка новых средств для проведения астрометрических наблюдений привела к резкому повышению точности определения координат объектов (искусственных спутников, звезд, радиоисточников) на небесной сфере и точек на земной поверхности.

³В идеальном случае небесная система координат должна быть инерциальной. Однако из-за непредсказуемых движений небесных тел и ошибок наблюдений возможны малые случайные и систематические повороты реализованной системы координат. Поэтому часто такую систему называют квазиинерциальной.

сти. Найдя из наблюдений параметры вращения Земли, можно определить ориентацию земной системы координат в пространстве, т. е. в конечном счете вычислить координаты небесных тел в инерциальной системе.

Это очень сложная задача, решение которой требует колоссальных затрат. Но мировое сообщество идет на эти расходы, так как это нужно для удовлетворения хозяйственных, политических, военных и научных потребностей.

0.2. Краткий исторический обзор

Астрометрия — одна из самых древних наук — появилась на заре человечества из-за необходимости человека определять свое местоположение, измерять промежутки времени, предсказывать наступление астрономических событий и т. д. Как и любая наука, астрометрия началась с накопления данных, которыми были результаты наблюдений за звездами, Солнцем, Луной, планетами. Измерение положений этих объектов явилось основой для построения первых моделей Вселенной.

Строго говоря, до изобретения телескопа в начале XVII века астрономия являлась астрометрией. Основными задачами древней астрономии были определения моментов определенных событий, связанных с религией, мифологией и т. д. Хозяйственные нужды требовали установления точного календаря, основанного на наблюдениях Солнца, Луны и звезд. Из большого количества клинописных глиняных табличек, найденных на территории Месопотамии, достоверно известно, что древнеавилонские астрономы вели регулярные наблюдения за небом. Вавилонские жрецы, которые, собственно, и занимались астрономией, вели и записывали наблюдения различных небесных явлений: затмений Солнца и Луны, появлений комет и других небесных тел. За ~ 2500 лет они установили периодичность затмений, что позволяло предсказывать их. Позднее наблюдения лунных затмений были использованы сначала Гиппархом, а затем Птолемеем для построения теории движения Луны.

В Вавилонии была изобретена шестидесятиричная система счисления, от которой идет современный счет времени: в одном часе содержится 60 минут, в одной минуте — 60 секунд. Лунно-солнечный календарь был создан здесь в начале второго тысячелетия до н. э.

Таблички донесли до нас указ царя Хаммурапи о введении дополнительного месяца с целью подтягивания продолжительности лунного года (354,36 суток) к солнечному (или тропическому) году — 365,24 суток.

Значительные достижения в астрономии связаны с наблюдениями древнеегипетских жрецов. Существование Египта зависело от разливов Нила, приносивших на поля плодородный ил. Если они запаздывали, стране грозили неурожай и голод. Неудивительно поэтому, что египтяне внимательно следили за важнейшим событием — появлением на небе Сириуса перед восходом Солнца, совпадавшим с ежегодным разливом Нила. Можно сказать, что египетскую астрономию создала необходимость вычисления периодов подъема и спады воды в Ниле. Египтяне дали определение *эклиптики* — видимого пути Солнца на фоне созвездий и разделили ее на двенадцать частей, образовавших Зодиак, т. е. «круг зверей». Наблюдения, проводившиеся жрецами, позволили создать точный солнечный календарь; была определена продолжительность года в 365, 25 суток. Для измерения времени использовались водяные и солнечные часы. Благодаря этим достижениям астрономов история Древнего Египта известна очень хорошо.

Наблюдения жрецов Вавилона и Египта не потеряли ценности и в наши дни. На основании записей моментов затмений жрецами и вычислений этих моментов с помощью современных теорий движения Земли и Луны оказалось возможным вычислить замедление скорости вращения Земли за последние ~ 2500 лет.

Дальнейший прогресс астрономии—астрометрии связан, в первую очередь, с достижениями в области математики во время расцвета древнегреческой науки. Астрономия в Древней Греции стала точной математической наукой.

Многому греческие ученые могли научиться у вавилонян. Этому способствовали торговые связи между городами Древней Греции и Вавилоном. Наиболее тесные контакты греков с вавилонянами относятся к эпохе Нововавилонского царства (605 г. до н. э. — 539 г. до н. э.). Это и было как раз время зарождения греческой науки. Многие достижения вавилонян в области наблюдательной астрономии были позже использованы греческими учеными.

Первым древнегреческим астрономом и математиком был Фалес Милетский, живший в конце VII — первой половине VI в. до н. э.

Он — один из «семи мудрецов» — прославился предсказанием солнечного затмения, случившегося в 585 г. до н. э., хотя реальная возможность такого предсказания, даже при условии, что Фалес был знаком с вычислениями вавилонских жрецов, в настоящее время подвергается сомнению. Ему приписывается также установление времени равноденствий и солнцестояний, определение продолжительности года в 365 суток, понимание того, что Луна светит не своим светом и т. д. Как и вавилоняне и египтяне, он не понимал того, что происходит во время затмений, а просто использовал периодичности, найденные жрецами Вавилона и Египта. Опираясь на результаты вавилонской науки, Фалес пытался разобраться в строении Вселенной, определить порядок расположения звезд, Солнца, Луны по отношению к Земле, которую он представлял плоским диском. Он считал, что ближе всего к Земле находятся звезды, а дальше всего — Солнце.

Анаксагоры из Клазомен (предположительно 500–428 гг. до н. э.) принадлежит заслуга правильного объяснения не только солнечных, но и лунных затмений. Происходя из богатой и знатной семьи, он отказался заниматься хозяйством и говорил, что родился для того, «чтобы созерцать Солнце, Луну и небо». Он утверждал, что Солнце — это огненная глыба, которая по размерам больше Пелопоннеса; Луна подобна Земле, на ней есть холмы и ущелья, она получает свет от Солнца и обитаема. Земля, по Анаксагору, плоская.

Эмпедокл из Агригента (около 490–430 гг. до н. э.) — астроном и философ, поэт и политический деятель, отказавшийся от царской власти, также объясняет затмения прохождением между Землей и Солнцем темной Луны. Неясно, какой представлял себе Эмпедокл форму Земли, но Луна у него имеет плоскую форму, получая свой свет от Солнца.

Поразительна догадка Эмпедокла о том, что свет распространяется с большой, но конечной скоростью. К сожалению, эта (и многие другие гениальные догадки древних греков) были отвергнуты благодаря авторитету Аристотеля, который писал: «Эмпедокл и всякий другой, придерживающийся того же мнения, неправильно утверждали, будто свет передвигается и распространяется в известный промежуток времени между землей и небесной твердью, нами же [это движение] не воспринимается» из-за того, что скорость света очень велика.

Впервые гипотеза о шарообразности Земли была сформулирована пифагорейцами. В пифагорейской школе оформилась классическая модель космоса, в которой небесные светила располагались на семи сферах, в следующем порядке по мере удаления от Земли: Луна, Солнце, Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. При своем вращении сферы издают отдельные тона. Например, звук Луны высокий и пронзительный, звук Сатурна самый низкий. В совокупности звуки образуют гармоничную мелодию — «музыку сфер», слышать которую, как утверждают античные источники, мог Пифагор, обладавший очень тонким слухом.

Пифагореец Филолай из Тарента, живший в конце V века до н. э., изменил эту модель. Он поместил в центр мира Огонь, вокруг которого вращается десять сфер: сфера неподвижных звезд, сферы пяти планет, сферы Луны, Солнца, Земли и невидимой «Противоземли». Филолай буквально поклонялся декаде. Поэтому Противоземля введена для круглого счета, как десятое небесное тело; с ее помощью «объяснялись» лунные затмения. Центральный огонь с Земли не виден, так как его загораживает Противоземля.

От теории пифагорейцев в современной астрономии сохранилось понятие «небесная сфера». Отказ от геоцентризма, признание шарообразной формы Земли, ее обращения вокруг центрального огня, объяснение времен года наклоном земной орбиты по отношению к солнечной орбите (Солнце тоже обращается вокруг центрального огня), объяснение солнечных затмений прохождением Луны между Солнцем и Землей представляли приближение к истине, без чего не возникла бы гелиоцентрическая система Аристарха Самосского.

Во второй половине V в. до н. э., благодаря наблюдениям афинских астрономов Метона и Эвктемона, была установлена продолжительность тропического года и неравенство времен года. Метон ввел 19-летний цикл, который содержит 6940 суток и почти в точности равен длительности 235 лунных (синодических) месяцев. Средняя длительность года в метоновом цикле составляла 365, 26316 суток, что всего на 19 минут длиннее введенного четырьмя столетиями позднее юлианского года (365, 25 сут.) и на 30 минут — длительности тропического года во время Метона (365, 2425 сут.) Длительность лунного месяца в метоновом цикле была всего на 2 минуты больше точного значения. Эвктемон из наблюдений равноденствий и солнцестояний нашел, что длительность весны равнялась 93 сут-

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru