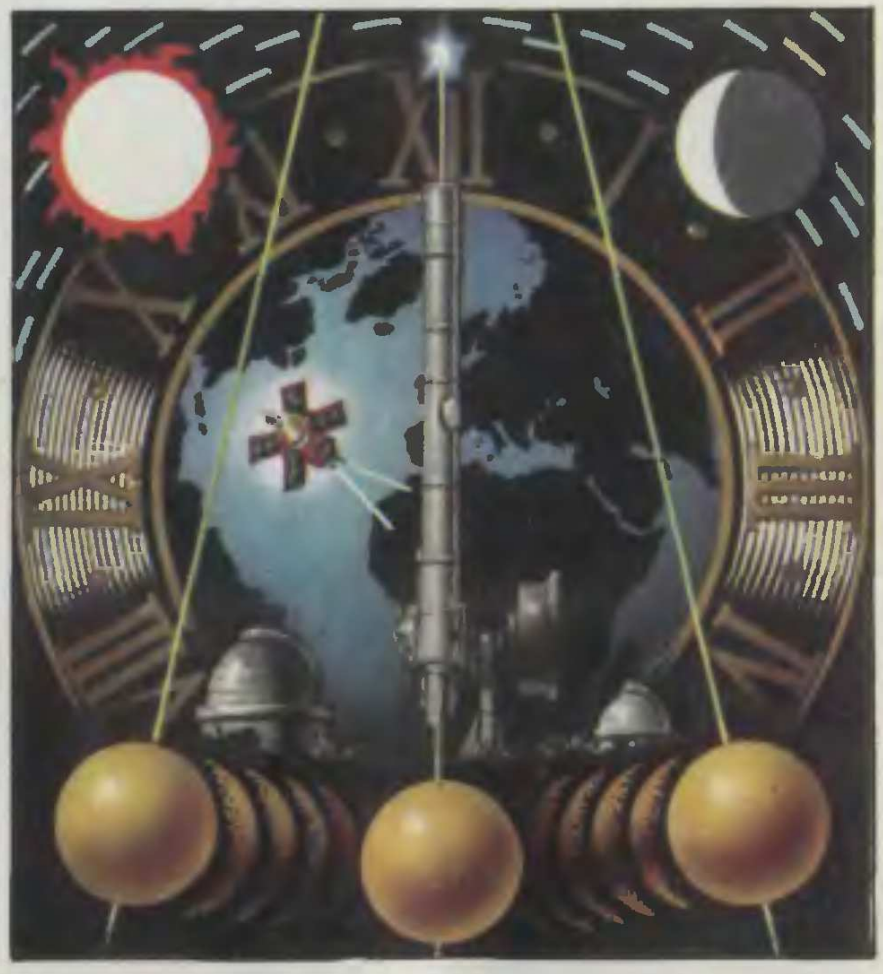


БИБЛИОТЕЧКА ·КВАНТ·
выпуск 35

А. А. МИХАЙЛОВ

ЗЕМЛЯ И ЕЁ ВРАЩЕНИЕ







БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»
ВЫПУСК 35

А. А. МИХАЙЛОВ

ЗЕМЛЯ И ЕЕ ВРАЩЕНИЕ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1984

22.654.1
М 69
УДК 525

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **И. К. Кикоин** (председатель), академик **А. Н. Колмогоров** (заместитель председателя), профессор **Л. Г. Асламазов** (ученый секретарь), член-корреспондент АН СССР **А. А. Абрикосов**, академик **Б. К. Вайнштейн**, заслуженный учитель РСФСР **Б. В. Воздвиженский**, академик **П. Л. Капица**, профессор **С. П. Капица**, академик **С. П. Новиков**, академик **Ю. А. Осипьян**, академик АПН СССР **В. Г. Разумовский**, академик **Р. З. Сагдеев**, профессор **Я. А. Смородинский**, академик **С. Л. Соболев**, член-корреспондент АН СССР **Д. К. Фаддеев**, член-корреспондент АН СССР **И. С. Шкловский**.

Михайлов А. А.

М 69 Земля и ее вращение. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984— 80 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 35). — 15 к.

Автор книги — старейший советский астроном, популярно рассказывает о планете, на которой мы живем,— о ее форме, размерах, массе, средней плотности, вращении, о том, какие доказательства подтверждают это вращение, как оно используется для измерения времени. Специальные разделы посвящены неравномерности вращения Земли и причинам этой неравномерности, изменению положения оси вращения Земли и изменению географических широт, некоторым проблемам календаря.

Для школьников и преподавателей географии, физики, астрономии.

М $\frac{1705050000—053}{053(02)-84}$ 209-83

ББК 22.654.1
526

М $\frac{1705050000—053}{053(02)-84}$ 209-83

© Издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1984

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

Эта книга принадлежит перу старейшего астронома нашей страны, многолетнего директора Пулковской обсерватории, академика Александра Александровича Михайлова.

Тема книги на первый взгляд может показаться частным вопросом астрономии и геофизики. Однако значение ее очень велико, так как по движению Солнца на небосклоне, обусловленном вращением Земли, люди впервые научились измерять время. Вот почему с древних времен эта проблема находилась в центре внимания выдающихся астрономов, математиков, физиков. Нигде, пожалуй, история науки не переплетается так тесно с историей человечества. Великие географические открытия совершались одновременно с развитием наших знаний о движении небесных светил, по которым ориентировались мореплаватели.

В наши дни исследование вращения Земли не потеряло своей актуальности. Возросшая точность измерений позволяет исследовать ряд интересных физических явлений. С помощью современных точных часов можно даже изучать особенности вращения Земли, вызываемые движением атмосферы, лунными приливами, землетрясениями.

Это уже вторая книга в нашей серии, посвященная вопросам геофизики. Те, кто прочел книгу А. В. Бялко «Наша планета — Земля» (М.: Наука, 1983. — Библиотечка «Квант», вып. 29), увидят, что они органично дополняют друг друга. В книге А. А. Михайлова больше внимания уделено развитию знаний о Земле и истории

астрономии. Ясность и наглядность изложения делают книгу доступной широкому кругу читателей.

Академик А. А. Михайлов работал над этой книгой до последних дней своей жизни Умер он 29 сентября 1983 г. в возрасте 95 лет. А. А. Михайлов уделял много времени и внимания популяризации науки и считал эту область своей многосторонней деятельности важной предпосылкой долголетия.

А. А. Михайлов внес большой вклад в развитие отечественной науки, воспитал много учеников. Память о нем навсегда останется в сердцах всех знавших его.

ФОРМА ЗЕМЛИ И ЕЕ РАЗМЕРЫ

Шарообразность Земли была известна в глубокой древности, о ней еще учил в VI веке до н. э. греческий математик и философ Пифагор. Она была открыта на основании ряда явлений, часть которых указывала лишь на выпуклость земной поверхности. Например, при удалении кораблей в море сначала скрываются их нижние части, тогда как мачты и паруса еще остаются видимыми над линией горизонта. Доказательством шарообразности являлась круглая тень Земли, падающая на Луну во время лунных затмений, о чем говорил Аристотель в IV веке до н. э. Еще более убедительным было явление, обнаруженное при путешествиях и состоящее в изменении наибольшей высоты светил, в частности Солнца, над горизонтом при перемещении наблюдателя в направлении меридиана, т. е. с севера на юг или обратно. Если ехать на юг, то звезды в южной части небосвода поднимаются выше и даже появляются такие, которые раньше были скрыты под горизонтом, а в северной части звезды спускаются ниже. Такое изменение высоты светил оказалось пропорциональным пройденному пути вдоль меридиана, что дало возможность определить размеры земного шара. Первое дошедшее до нас измерение окружности Земли таким способом было произведено за 250 лет до н. э. греческим геометром Эратосфеном, который знал, что в день летнего солнцестояния в египетском городе Сиена (нынешнем Асуане) Солнце в полдень бывает в зените и его лучи доходят до дна глубоких колодцев, тогда как на том же меридиане в Александрии оно отстоит от зенита на 7,2°, т. е. на 1/50 часть длины окружности. Отсюда следовало, что расстояние между этими городами равно 1/50 части длины окружности Земли, и, приняв это расстояние равным 5000 древне-

греческих стадий, Эратосфен получил длину земной окружности в $50 \times 5000 = 250\,000$ стадий. Хотя точная длина древнегреческой стадии неизвестна, но, по-видимому, она близка к 175 м, что дает для окружности

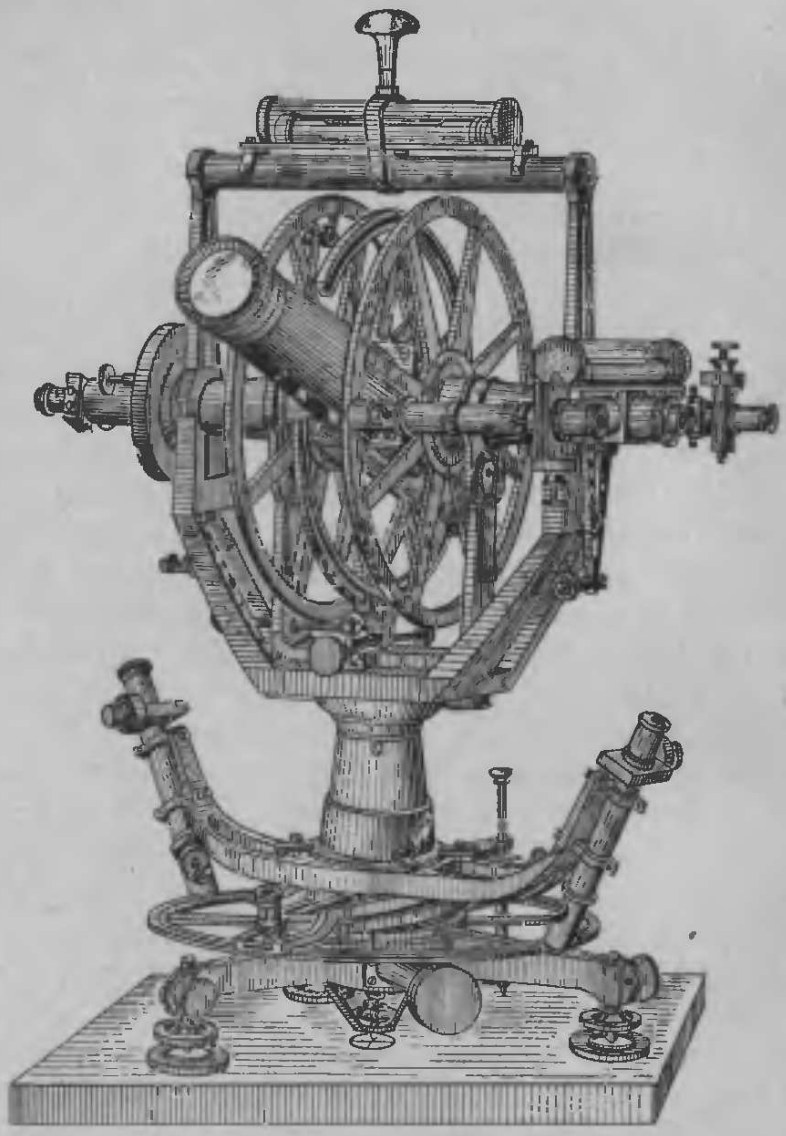


Рис. 1. Большой теодолит — универсальный инструмент для точного измерения горизонтальных и вертикальных углов (модель старой конструкции).

Земли 44 000 км, а для ее радиуса $44\,000/2\pi = 7000$ км, что довольно близко к действительности.

Способ Эратосфена состоит из двух частей: определения дуги в угловой мере между двумя пунктами, лежащими на одном меридиане, и измерения расстояния между ними в линейной мере. Ныне такая операция называется градусным измерением. Можно подумать, что первая часть более трудная, чем вторая, но оказывает-

ся наоборот. Дуга в угловой мере находится измерением с помощью угломерного инструмента — теодолита (рис. 1) меридианной высоты светила, например полуденной высоты Солнца, что требует наблюдений лишь в этих двух крайних пунктах меридиана и всего нескольких часов времени. Измерение же расстояния вдоль дуги меридиана длиной в сотни километров через все препятствия — горы, реки, леса и т. п.— гораздо более трудное и длительное дело. Для его облегчения голландский географ и математик Снеллиус в начале XVIII века предложил метод триангуляции, состоящий в построении ряда смежных треугольников, вершины которых образуют хорошо видимые издали объекты — вершины гор, высокие здания и башни, специальные сооружения в виде пирамид, называемые в геодезии сигналами. Теодолитом измеряются все углы в этих треугольниках, в линейной мере измеряется лишь одна сторона, которая выбирается в наиболее удобной, открытой и ровной местности и называется базисом. Ее длина обычно не превосходит десятка километров. Последовательным решением всех треугольников, начиная с содержащего базис, вычисляют расстояние между вершинами первого и последнего треугольников, что и дает искомую длину дуги меридиана в линейной мере. Вершины треугольников вместе с теми используются для точной топографической съемки местности и составления географических карт, так как их координаты вычисляются при решении треугольников. Обычно производство триангуляции требует многих помощников и продолжается месяцы и даже годы (рис. 2).

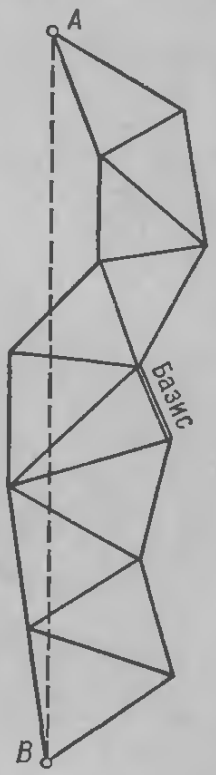


Рис. 2. Схема триангуляции.

Начиная с XVII века в разных странах Европы стали производиться градусные измерения, в основе которых лежит метод Эратосфена. Одна из самых больших и точных триангуляций была произведена в 1821—1831 гг. на западе России под руководством и при участии В. Я. Струве, впоследствии основателя и первого директора Пулковской обсерватории. Совместно с норвежскими геодезистами была измерена дуга, простиравшаяся от берега Дуная через Россию, Финляндию,

Швецию и Норвегию до Северного Ледовитого океана. Триангуляция состояла из 258 треугольников, в которых для уверенности было измерено 10 базисов. Общая длина измеренной дуги равнялась 2800 км.

Самое северное градусное измерение было произведено в 1899—1901 гг. в основном русскими астрономами и геодезистами при участии директора Пулковской обсерватории О. А. Баклунда на острове Шпицберген в

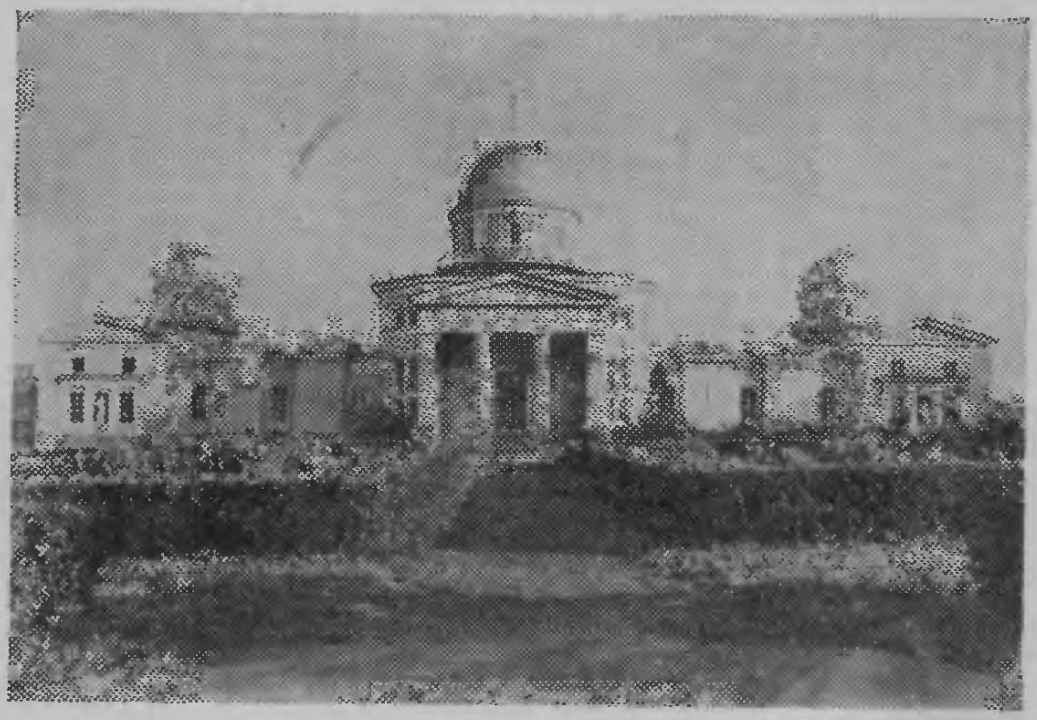


Рис. 3. Главное здание Пулковской обсерватории (северный фасад). Под средним куполом находится круглый зал с геодезическим центром.

пределах широт от +76 до +80°. Заметим, что в настоящее время вся территория Советского Союза покрыта сетью треугольников, исходной точкой которых является центр круглого зала главного здания Пулковской обсерватории, находящейся в окрестности Ленинграда (рис. 3 и 4).

Градусные измерения позволяют не только определить размеры Земли, но и детально исследовать ее форму. Если бы единица дуги меридиана (положим, в 1°) оказалась всюду одинаковой длины, то это было бы доказательством, что Земля есть точный шар. Однако триангуляции, выполненные в начале XVIII века во Франции, как будто показали, что длина дуги меридиана в 1° немного увеличивается к югу, т. е. к эква-

тору, что указывало на вытянутость Земли в направлении оси вращения. Такой результат противоречил теоретическим соображениям Ньютона, согласно которым вращение Земли создает центробежную силу, растягивающую Землю по экватору сплющивающую ее у



Рис. 4. Круглый зал Пулковской обсерватории. В его середине находится геодезический центр, через который проходит Пулковский меридиан — от него считались долготы на старых русских картах. В глубине — бюст основателя и первого директора обсерватории В. Я. Струве (1793—1864).

полюсов. Телескопические наблюдения быстро вращающихся больших планет — Юпитера и Сатурна тоже обнаружили их сплюснутую форму. Возник спор между французскими учеными, отстаивавшими результаты своих градусных измерений, с английскими, которые руководствовались теорией механики.

Для решения этого спорного вопроса Парижская академия наук снарядила в 30-х годах XVIII столетия

две большие экспедиции с участием крупных астрономов, физиков и математиков, в частности шведского астронома и физика Цельсия, по имени которого названа предложенная им шкала температур. Одна экспедиция измерила длину дуги меридиана в 1° у полярного круга в Лапландии по долине реки Торнио между Финляндией и Швецией. Другая экспедиция отправилась на экватор в Южную Америку — Перу. Результаты измерений, сопоставленные по возвращении во Францию, с несомненностью выявили, что длина градуса меридиана увеличивается от экватора к полюсам, и сплюснутость Земли у полюсов была этим окончательно доказана.

Здесь может возникнуть вопрос: ведь в случае сплюснутости Земли ее полярный радиус, т. е. расстояние от центра до полюса, короче экваториального радиуса, поэтому, казалось бы, и длина угловой единицы дуги меридиана должна изменяться в том же направлении и увеличиваться от полюса к экватору. Это кажущееся противоречие устраняется тем, что градусное измерение дает не радиус Земли, т. е. не расстояние ее поверхности от центра, а радиус кривизны, или радиус той окружности, которая на данном небольшом участке

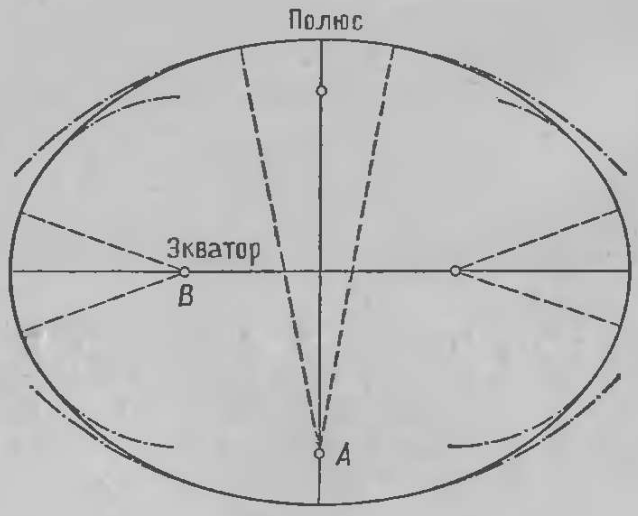


Рис. 5. Меридиан эллипсоида. *A* — центр кривизны дуги у полюса, *B* — у экватора.

ближе всего соответствует дуге меридиана, что пояснено на рис. 5. Если Земля имеет форму эллипсоида вращения, сплюснутого у полюсов, то ее меридианы являются эллипсами, которые у полюсов, близ малой оси $2b$, изогнуты слабее, чем у экватора, близ большой оси $2a$, где кривизна меридианов сильнее, а следовательно, их

радиус кривизны короче. Для примера приведем радиусы кривизны для земного эллипсоида Красовского, о котором будет сказано дальше. Для него радиус кривизны дуги меридиана у полюсов равен 6 399 699 м, а у экватора 6 335 553 м, т. е. на 64 146 м меньше.

Именно эти радиусы и определяются при градусных измерениях, из которых выводятся размеры и фигура Земли, т. е. сжатие земного эллипсоида α, показывающее, на какую долю малая (полярная) полуось b короче большой (экваториальной) полуоси a,

$$\alpha = \frac{a-b}{a} = 1 - \frac{b}{a}.$$

Уже градусные измерения XVIII века дали для α значение, близкое к 1/300; именно на столько полярная полуось короче экваториальной. Представим себе школьный глобус диаметром 30 см. Тогда для точного представления Земли полярная полуось должна быть на 0,5 мм короче экваториальной. Такое незначительное отступление от точного шара будет совершенно незаметно на глаз, да и школьный глобус из папье-маше будет иметь гораздо бóльшую неправильность формы.

Кроме установления формы и размеров Земли, градусные измерения имели еще другое важное значение. До XIX века в разных странах употреблялись весьма разнообразные единицы длины и веса. Даже при одинаковых названиях они значительно различались между собой. Распространенная единица длины, называвшаяся футом, должна была равняться длине ступни человека, обычно короля или правителя данной страны. Подразделения фута — дюймы — должны были равняться толщине большого пальца руки. Сами названия этих единиц говорят об их происхождении. Так, например, слово фут происходит от немецкого fuss или английского foot, что означает «нога», а дюйм — это искаженное немецкое слово «daumen» — большой палец руки. Разных по величине футов и дюймов были десятки, в каждой мелкой стране свои.

В России для измерения длины употреблялся аршин, который равнялся одному шагу при быстрой ходьбе. Единица веса — фунт тоже различалась в разных странах. Все это создавало большие трудности и путаницу, особенно при развитии торговли, так что во время французской революции Конвент принял решение о

введении новой единицы длины, взятой из неодушевленной природы, причем конкурировали два проекта: связать единицу длины с размерами Земли или принять за единицу длины длину математического маятника, качающегося с периодом в одну секунду. Последний проект был забракован, так как нерационально ставить единицу длины в зависимость от измерения времени, а кроме того, период маятника зависит от ускорения силы тяжести, различной в разных местах.

Было решено за новую единицу длины принять одну десятимиллионную часть четверти земной окружности по меридиану, проходящему через Париж, т. е. расстояние от экватора до северного полюса. Для уточнения этого расстояния было произведено новое градусное измерение вдоль парижского меридиана. Это было сделано в самый разгар революции во Франции, что создавало большие трудности и даже подвергало ученых опасности. В сочетании со старым измерением, произведенным в Перу, было определено сжатие земного эллипсоида, необходимое для вычисления длины дуги меридиана по измерениям его сравнительно небольшого участка. Новая единица длины была названа метром и осуществлена в виде массивного стержня сложного профиля из стабильного материала — сплава платины с иридием, который был передан на вечное хранение в парижский архив. Так было положено начало метрической системы мер и весов, которая сначала была принята во Франции, а потом, ввиду несомненного ее удобства, стала постепенно вводиться и в других странах, причем наиболее консервативными оказались Англия и Соединенные Штаты Америки, где до сих пор еще продолжают употребляться футы и дюймы. В Советском Союзе метрическая система была введена постановлением Совета Народных Комиссаров (СНК) в 1918 г.

Последующие градусные измерения показали, что длина метра как сорокамиллионная часть окружности Земли по меридиану немного занижена, но менять принятое значение длины метра было бы неразумным, так как каждое новое градусное измерение вносило бы все новые поправки, да и Земля не имеет фигуры идеального эллипсоида вращения и разные меридианы слегка отличаются по длине.

Приведем результаты новейших определений размеров и сжатия Земли, имеющих широкое применение (см. табл. 1, где a и b — полуоси, α — сжатие эллип-

Таблица 1

Эллипсоид	a, м	b, м	α	Q, м
Международный (1924 г.)	6 378 388	6 356 912	1/297,0	10 002 288
Красовского (1941 г.)	6 378 245	6 356 863	1/298,3	10 002 137
Международного Астрономического Союза (1976 г.)	6 378 140	6 356 755	1/298,257	10 001 970

соида, Q — длина четверти меридиана, которая по определению метра должна была бы содержать ровно 10 000 000 м). Отсюда видно, что метр примерно на 0,0002 часть, или на 0,2 мм, короче своей идеальной длины. Такое различие уже заметно невооруженным глазом.

По поводу приведенных в таблице значений заметим следующее. Международный эллипсоид 1924 г. выведен по триангуляциям главным образом в США, Западной Европе и Индии. В эллипсоиде Красовского, принятом в СССР и социалистических странах, главную роль сыграла триангуляционная сеть на территории Советского Союза с учетом измерений в других странах, и поэтому он лучше всего представляет фигуру Земли именно для СССР. Элементы эллипсоида 1976 г. получены преимущественно по наблюдениям специальных искусственных спутников Земли из многих мест в разных странах и поэтому наиболее подходят для всей Земли в целом.

Определив размеры земного эллипсоида, нетрудно вычислить его объем, равный $^4/_3\pi a^2 b$. Ограничиваясь пятью значащими цифрами, получим объем

$$V = 1{,}0832 \cdot 10^{27} \text{ см}^3,$$

который нам понадобится дальше. При этом можно использовать элементы любого эллипсоида приведенной таблицы.

Возвращаясь к принятой единице длины — метру, отметим, что ее неточность вследствие отклонения от идеальной, как определенной части земного меридиана не имеет ни малейшего значения. Основную единицу можно принять любой длины, важно лишь, чтобы она была постоянна и хорошо закреплена, чтобы ее можно было легко восстановить в случае потери прототипа —

архивного метра в Париже. Поэтому и была взята эта длина из природы, однако восстановление, в случае необходимости, длины метра путем новых градусных измерений не может обеспечить требуемой точности. В результате сделали несколько десятков копий архивного метра, которые были розданы разным странам. Ныне длина метра закреплена наиболее точным и надежным способом с помощью интерференции света, именно числом световых волн определенных спектральных линий. Много точнее, чем до одной миллионной доли, она равна 1 650 763,73 длины волны излучения в вакууме оранжевой спектральной линии изотопа криптона ^{86}Kr и может быть восстановлена в лаборатории на основании одного этого числа.

Итак, фигура Земли очень близка к эллипсоиду вращения со сжатием 1/298. Конечно, речь идет не о физической поверхности Земли с материками, высокими горами и морскими глубинами, отклоняющимися от правильной фигуры до десяти километров. Под фигурой Земли принято понимать поверхность океанов, отвлекаясь от волн, приливов, влияния изменений атмосферного давления и продолжая эту поверхность под материками с помощью нивелировок. Эта поверхность является уровенной, она всюду перпендикулярна к направлению силы тяжести, т. е. к отвесной линии, и называется геоидом, от греческого слова «геос» — Земля. Она отличается от эллипсоида вращения не больше чем на несколько сотен метров, и если учесть, что земной экватор обнаруживает небольшое отступление от правильной окружности и ближе подходит к эллипсу с разностью полуосей около 200 м, то отличие геоида от такого трехосного эллипсоида не превышает 100 м. Это отличие обусловлено неравномерным распределением масс как в виде континентов, так и в самой земной коре. Неравномерное распределение масс слегка влияет и на силу тяжести, как на ее величину, так и направление. Мы говорим «слегка», так как основная часть силы тяжести создается притяжением всех масс внутри Земли, в миллионы раз превосходящих те массы, которые вызывают отклонение фигуры Земли от эллипсоида. Изучение фигуры Земли со всеми ее небольшими неправильностями, или фигуры геоида, есть одна из задач геодезии и гравиметрии (гравиметрия — наука об измерении ускорения силы тяжести, от латинского слова gravitas — тяжесть).

УСКОРЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, МАССА И СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ ЗЕМЛИ

Согласно закону всемирного тяготения, впервые сформулированному Ньютоном в конце XVII века, каждые две материальные точки, т. е. две массы m_1 и m_2 исчезающе малых размеров, взаимно притягиваются с силой, пропорциональной произведению масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Эта сила равна

$$F = k\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от единиц измерения масс и расстояния. Из очень тонких лабораторных опытов найдено, что если массы измерять граммами, а расстояние сантиметрами, то $|k| = 6{,}672 \cdot 10^{-8}$, т. е. совершенно ничтожная величина, вследствие чего мы не замечаем притяжения со стороны окружающих нас предметов. Лишь когда одна из масс очень большая, ее сила притяжения становится заметной. Такой большой массой является Земля в целом, и поэтому ее сила притяжения превосходит силу притяжения всех других земных предметов и создает основную часть ускорения силы тяжести, направленной почти к центру Земли. Мы говорим «почти», а не прямо к центру, по двум причинам. Как показал Ньютон, однородный шар притягивает внешнюю точку так, как будто вся его масса сосредоточена в его центре. То же самое имеет место и для шара, состоящего из ряда концентрических слоев разной плотности. Поэтому если Земля была бы строго шарообразной формы и не вращалась, то ее сила притяжения во всех внешних точках и на поверхности была бы направлена к центру. Но эллипсоидальная Земля не обладает этим свойством, и только на полюсах и экваторе, вследствие полной симметрии расположения масс, сила притяжения продолжала бы быть направленной к центру. В промежуточных широтах направление силы притяжения проходит мимо центра, притом больше всего отклоняется в точках, лежащих посредине между полюсами и экватором, т. е. на широте $\pm 45°$. Здесь направление силы притяжения при сжатии α эллипсоида отклоняется от направления к центру на угол $\alpha/2$ или на $5{,}7'$.

То, о чем мы только что говорили, относится к притяжению Земли согласно закону всемирного тяготения,

но это еще не есть ускорение силы тяжести, в которое входит еще малой составляющей центробежное ускорение, возникающее от суточного вращения Земли. Последнее направлено перпендикулярно оси вращения по радиусу r круга, образованного параллелью, и лежит в его плоскости. Центробежное ускорение равно $\omega^2 r$, где $\omega = 2\pi/T$ есть угловая скорость вращения с периодом T, выраженным в единицах времени. Для Земли, как мы увидим дальше, $T = 86\,146$ с. Заметим, что в формулу для центробежного ускорения ω входит во второй степени и поэтому оно не зависит от направления вращения. Согласно той же формуле это ускорение достигает наибольшей величины на экваторе, где $r = a$. Здесь $\omega^2 a = 3{,}39$ см/с^2, что составляет 1/288 долю ускорения силы тяжести, равного на экваторе 980,03 см/с^2. Заметим, что единица измерения силы тяжести, точнее говоря, ускорения, которое она сообщает свободно падающим телам, называется галом в честь великого итальянского физика и астронома Галилея (и эквивалентна 1 см/с^2). В дальнейшем мы будем пользоваться таким обозначением.

На экваторе центробежная сила прямо противоположна силе притяжения и поэтому из нее вычитается, эта разность и составляет упомянутые 980,03 гала. На полюсах центробежная сила отсутствует и не дает боковой составляющей, поэтому и на экваторе и на полюсах она не влияет на направление силы тяжести. В промежуточных широтах центробежная сила пропорциональна радиусу параллели, который равен $r = \rho \cos \varphi'$, где ρ — радиус-вектор, т. е. расстояние от центра Земли, а φ' — его угол с плоскостью экватора, называемый геоцентрической широтой. Эта геоцентрическая широта отличается от обычной, географической широты φ, равной углу вертикальной линии, проходящей через данную точку, с плоскостью экватора, на величину $\varphi - \varphi'$, зависящую от сжатия Земли. Математический вывод дает для этой разности

$$\varphi - \varphi' = 11{,}6' \sin 2\varphi.$$

Отсюда следует, что, согласно сказанному, на экваторе и полюсах $\varphi - \varphi' = 0$. Эта разность достигает наибольшей величины при $\varphi = \pm 45^\circ$.

Итак, центробежное ускорение равно $\omega^2 r = \omega^2 \rho \cos \varphi'$ и направлено по радиусу параллели от земной оси. Его вертикальная составляющая равна $\omega^2 \rho \cos \varphi' \cos \varphi$, а го-

ризонтальная составляющая, направленная по меридиану к экватору, — $\omega^2\rho\cos\varphi'\sin\varphi$ (рис. 6). Разность значений φ и φ' столь мала, что в этих формулах нет надобности различать их и можно писать всюду φ. Тогда вертикальная составляющая центробежного ускорения будет $\omega^2\rho\cos^2\varphi$, а горизонтальная $\omega^2\rho\cos\varphi\sin\varphi = {}^1/_2\omega^2\rho\sin 2\varphi$, тоже достигающая наибольшей величины на широте $\pm 45°$, где она становится равной 1,7 гала. Спрашивается, на сколько такая боковая сила отклоняет направление вертикали? Ускорение силы тяжести

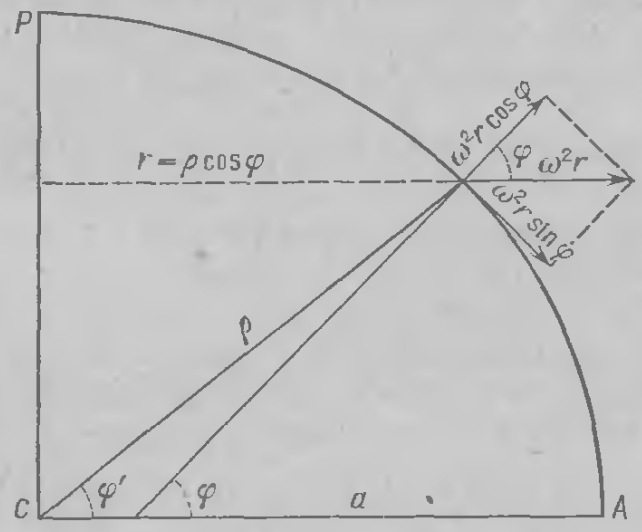


Рис. 6. Действие центробежной силы. Разложение центробежного ускорения на вертикальную и горизонтальную составляющие.

на поверхности Земли круглым счетом равно 980 галов. Построив параллелограмм сил, который в данном случае превращается в прямоугольник, найдем, что это отклонение равно отношению этих чисел, т. е. $1{,}7/980 \approx$ $\approx 0{,}0017$ в радианной мере или 5,9 минут дуги. Таким образом, общее отклонение силы тяжести от направления к центру Земли составляет $11{,}6'\sin 2\varphi$ и достигает наибольшего значения 11,6′ на широте $\pm 45°$. Что касается влияния центробежной силы на силу тяжести, то оно равно проекции центробежной силы на направление вертикали в данном месте. Направление вертикали можно заменить направлением к центру Земли, так как угол между этими направлениями, как мы показали, пренебрежимо мал. Тогда вертикальная составляющая центробежного ускорения становится равной $\omega^2\rho\cos^2\varphi$, что дает $\omega^2 a$ на экваторе, ${}^1/_2\omega^2\rho$ — на широте $\pm 45°$ и нуль — на полюсах. Заметим, что в предыдущих фор-

мулах можно без ощутимой ошибки радиус-вектор ρ заменить радиусом экватора a. Таким образом, центробежная сила уменьшает притяжение Земли, на экваторе это составляет 1/288, или круглым счетом 1/300 долю. Но и сила притяжения на поверхности сплюснутой Земли тоже слегка различна: на экваторе она на $\alpha/2$ меньше, чем на полюсе, что при α, близком к 1/300, составляет 1/600 долю. Эти два влияния в сумме составляют $1/600 + 1/300 = 1/200$, т. е. на столько ускорение силы тяжести меньше на экваторе, чем на полюсах.

Точный вид формулы, выражающей ускорение силы тяжести в зависимости от широты, вывел теоретически в 1743 г. французский математик А. Клеро. Он получил

$$g = g_0(1 + \beta \sin^2 \varphi), \qquad \beta = \frac{g_0 - g_p}{g_0},$$

где g_0 есть значение ускорения силы тяжести на экваторе, g_p — на полюсе, а коэффициент $\beta = {}^5/_2 q - \alpha$. Здесь q есть отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести на экваторе $g = \omega^2 a/g_0$, а α, как и прежде,— сжатие Земли. В современных числовых значениях формула Клеро такова:

$$g = 978{,}03\,(1 + 0{,}00529 \sin^2 \varphi).$$

Измерение ускорения силы тяжести в разных местах, не обязательно на экваторе и полюсе, позволяет определить числовое значение β, а отсюда и сжатие Земли, которое в хорошем согласии с градусными измерениями тоже оказалось равным $\alpha = 1/298{,}3$, что служит доказательством правильности теории. Существует несколько способов измерения ускорения силы тяжести, из них наиболее простой— по периоду качаний маятника известной длины l: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, откуда $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$.

Впоследствии оказалось, что определение ускорения силы тяжести позволяет не только получить величину сжатия Земли, но и детально исследовать ее фигуру, т. е. найти отклонения геоида от точного эллипсоида, и, кроме того, получить важные сведения о внутреннем строении Земли. В связи с этим в настоящее время точное значение ускорения силы тяжести измерено во многих тысячах пунктов в разных странах и даже на водной поверхности океанов и морей.

Теперь у нас все подготовлено для определения массы и средней плотности Земли. Найдем силу земного притяжения на поверхности эллипсоида на широте 45°. По формуле Клеро ускорение силы тяжести там равно 980,62 гала. Центробежное ускорение в этой точке составляет $q = \omega^2 a \cos 45°$, а спроектированное на вертикальное направление дает $\omega^2 a \cos 45° \sin 45° = {}^1/_2\omega^2 a$, и, подставив сюда значения ω и a, получим 1,70 гала. Найдем ускорение силы притяжения, прибавляя эту величину к ускорению силы тяжести. Отсюда ускорение силы притяжения Земли на широте 45° становится равным 982,32 гала, но по формуле Ньютона это ускорение равно $k\frac{M}{R^2}$, где $|k| = 6{,}672 \cdot 10^{-8}$. Сравнивая эти величины, приняв $R = 6{,}370 \cdot 10^8$ см (средний радиус Земли), получим для массы Земли $M = 5{,}98 \cdot 10^{27}$ г. Деля эту массу на объем, ранее найденный нами: $V = 1{,}0832 \cdot 10^{27}$ см^3, получим среднюю плотность Земли $M/V = 5{,}52$ г/см^3 — очень большую, в 2 раза больше плотности земной коры. Отсюда можно заключить, что внутри Земли находится много тяжелых веществ, очевидно, металлов, и если учесть, что Земля имеет свойства магнита, о чем, например, свидетельствует стрелка компаса, и что намагничивать можно только железо и в меньшей степени никель — металлы, очень распространенные в природе, то приходим к заключению о существовании в центре Земли большого железоникелевого ядра.

Описанным путем астрономические наблюдения (установление длительности секунды времени и определение географической широты), измерение длин на поверхности Земли (градусные измерения) и наблюдение качаний маятника позволили найти массу и среднюю плотность всей Земли и получить важные сведения об ее внутреннем строении, не делая никаких предположений или гипотез.

Согласно формуле Клеро изменение ускорения силы тяжести от экватора к полюсам составляет 1/190 долю, а до широты 60°, на которой находится Ленинград, на 1/250 долю. Поэтому тело массой 250 кг в Ленинграде на 1 кгс тяжелее, чем на экваторе.

Влияет также и высота над уровнем моря, именно на каждые 1000 м высоты ускорение силы тяжести уменьшается на 0,3 гала. Эти изменения нужно, строго говоря, учитывать и при атлетических состязаниях.

Предположим, например, что серевнования по тяжелой атлетике происходят в столице Колумбии Боготе, которая находится на широте +5° и высоте 2600 м над уровнем моря. На этой широте ускорение силы тяжести равно 978,1 гала и за счет высоты оно еще на 0,8 гала меньше, что в общей сложности дает 977,3 гала. В Ленинграде на широте 60° и уровне моря ускорение силы тяжести составляет 981,9 гала — на 4,6 гала больше. Допустим, что атлет самого тяжелого веса установил в Боготе мировой рекорд, подняв в толчке штангу в 250 кг. Приехав в Ленинград, он не смог повторить свой рекорд, так как штанга стала на 1 кгс тяжелее, хотя взвешивание штанги никакой разницы не дало, так как гири на весах тоже стали тяжелее. Лишь пружинные весы, в которых вес тела определяется по растяжению пружины, показали бы разницу в весе штанги. Руки атлета можно уподобить такой пружине.

Менее заметно описанное явление влияет в других видах спорта, например, в состязании в прыжках с шестом. Здесь разница составила бы лишь 2 см при прыжке на 5 м высоты и вряд ли была бы замечена. Спрашивается, почему различие в силе тяжести не учитывается при установлении мировых спортивных рекордов? Может быть, спортсмены недостаточно знают физику?

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ И ЕГО ДОКАЗАТЕЛЬСТВА

Если шарообразность и даже приблизительные размеры Земли были известны уже более двух тысяч лет, то о ее вращении люди узнали лишь в середине XVI столетия, менее четырех с половиной веков назад, благодаря великому польскому ученому Копернику. Правда, в древности было одно дошедшее до нас высказывание о вращении Земли — греческого астронома Аристарха в III веке до н. э., но это было в порядке философской мысли, не претендующей на реальность.

Коперник в своей знаменитой книге «О вращении небесных сфер», вышедшей в 1543 г., говорит об относительности наблюдаемых движений. Вот его слова: «...при движении корабля в тихую погоду все находящееся вне представляется мореплавателю движущимся, как бы отражая движение корабля, а сам наблюдатель считает себя в покое со всем с ним находящимся. Это

же, без сомнения, может происходить и при движении Земли, так что мы думаем, будто вокруг нас вращается вся Вселенная».

В этих словах особенно важно замечание, что мореплаватель может считать себя неподвижным, если движение корабля совершается в тихую погоду, так как при волнующемся море качка корабля ясно указала бы на его движение. То же самое относится и к движению Земли. Во времена Коперника еще не были известны те явления, которые, подобно качке корабля, непосредственно указывали на движение Земли вокруг Солнца и суточное вращение ее вокруг оси. Тем не менее Коперник был убежден в существовании этих движений, поэтому и привел пример о мореплавателе на корабле в тихую погоду; было бы совершенно невероятно допустить, что на самом деле движутся все окружающие предметы — гавань, берега с городом и горами, а не крохотный по сравнению с ними корабль.

Коперник еще не отрешился от представления звездного неба как огромной сферы, окружающей солнечную систему, к внутренней поверхности которой прикреплены звезды. В действительности нас окружает безграничное космическое пространство, в котором на разных расстояниях как между собой, так и от Земли, рассеяны различные объекты — горячие звезды, облака светящегося и темного газа, метеорное вещество. Не будучи в состоянии воспринять глубину пространства, мы относим их на одинаковое расстояние, откуда и возникло представление небосвода или небесной сферы, концентрически окружающей Землю. Наблюдения показывают, что эта сфера вращается с востока на запад вокруг оси, проходящей близ звезды второй величины в созвездии Малой Медведицы и поэтому называемой Полярной. Радиус этой сферы настолько велик, что Коперник о нем сказал: «Он заставляет исчезать из вида даже орбиту годового движения Земли» и что между наивысшей (т. е. наиболее удаленной от Солнца) планетой Сатурн и сферой неподвижных звезд находится еще очень большой промежуток. Здесь термин «неподвижные звезды» употребляется в том смысле, что видимое расположение звезд между собой остается неизменным и они нам кажутся прикрепленными к небесной сфере.

В связи с этим Коперник дальше рассуждает, что «небо неизмеримо велико по сравнению с Землей и

представляет бесконечно большую величину. По оценке наших чувств Земли по отношению к небу — как точка к телу, а по величине как конечное к бесконечному». Далее он говорит: «Гораздо более удивительным было бы, если бы в двадцать четыре часа поворачивалась такая громада мира, а не наименьшая ее часть, которой является Земля».

Эти рассуждения Коперника совершенно убедительны, и с того времени гелиоцентрическая система мира, несмотря на противодействие церкви, усматривавшей в ней еретическое учение, подрывающее авторитет священного писания, стала понемногу распространяться, в особенности после первых телескопических наблюдений Галилея в начале XVII века, открывшего фазы Венеры и четыре спутника Юпитера. Вскоре вращение Земли стало общепринятым фактом, хотя прямых доказательств ему еще не было. Под прямыми доказательствами мы имеем в виду такие явления или опыты, которые можно объяснить не иначе, как вращением Земли.

На одно такое явление указал Ньютон. Его современник Р. Гук — «куратор опытов» Королевского общества, т. е. Британской академии наук, пытался его воспроизвести, но безрезультатно. Речь идет об отклонении свободно падающих тел к востоку от вертикали. Сущность этого явления состоит в следующем.

Представим себе где-нибудь на Земле, только подальше от ее полюсов, высокую башню. Ее вершина, отстоящая дальше от оси вращения Земли, описывает в течение суток окружность большего радиуса, чем ее основание, а потому и имеет бóльшую линейную скорость. Заметим, что наибольшую линейную скорость имеют точки экватора, где она равна 465 м/с, а на промежуточных параллелях с широтой φ составляет $465 \cos \varphi$ м/с и на полюсах равна нулю. При свободном падении с башни без горизонтального толчка падающее тело сохраняет вследствие инерции приобретенную на башне линейную скорость, направленную с запада на восток, и, упав на землю у подножия башни, отклоняется в сторону вращения башни, т. е. к востоку. Однако такое отклонение очень мало вследствие малой разницы в линейных скоростях вершины башни и ее основания, а также краткости времени падения тела. Поэтому не удивительно, что Гуку, производившему в конце XVII века опыт в лабораторных условиях, не удалось обнаружить этого явления.

Лишь гораздо позже были получены положительные результаты: Ф. Бенценберг в 1802 г. в Гамбурге наблюдал падение тел в башне с высоты 76 м. В среднем из 31 опыта было получено отклонение в 9,0 мм. Он же в шахте наблюдал падение тел с высоты 85 м и получил отклонение в 11,5 мм. Ф. Рейх в Саксонии, тоже в шахте, при высоте падения 158 м получил 28,4 мм. Все эти отклонения согласуются с расчетными в пределах 10 %, что при трудности опытов было вполне удовлетворительным.

Наиболее наглядно и убедительно вращение Земли доказывается опытом, основанном на свойстве маятника, подвешенного так, чтобы он мог свободно качаться в любом направлении, сохранять относительно внешнего пространства плоскость своих колебаний при вращении опоры, к которой он подвешен. Соответствующий опыт был впервые продемонстрирован французским физиком Л. Фуко в 1851 г. в здании парижского Пантеона. Маятник длиной 67 м состоял из проволоки, на которой висел латунный шар массой 28 кг. Отклоненный в сторону и затем освобожденный без бокового толчка, маятник сохранял направление своих качаний относительно внешнего пространства, независимо от здания, вращавшегося вместе с Землей.

В противоположность опыту с падением тел, в котором отклонение пропорционально косинусу широты и поэтому максимально на земном экваторе, а на полюсе равно нулю, плоскость колебаний маятника Фуко поворачивается относительно вращающейся Земли пропорционально синусу широты, т. е. в полной мере на полюсе и при отсутствии поворота на экваторе, что пояснено на рис. 7. Мы видим, что на полюсе направление каждого меридиана, вращающегося вместе с Землей, совершает полный оборот в 360° за одни сутки (звездные), тогда как на экваторе все меридианы переносятся поступательно, т. е. параллельно самим себе, и остаются неизменно направленными в одну и ту же точку небесной сферы.

Широта Парижа $\varphi = 48°\,50'$. Плоскость качаний маятника поворачивается там за сутки на $360° \sin\varphi = 271°$, так что полный оборот на 360° она совершает в 360/271 суток или за 32 ч. Полный период качаний маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, где, как и раньше, l — длина маятника, а g — ускорение силы тяжести. В опыте

Фуко было $l = 67$ м и $g = 9{,}81$ м/с^2, откуда период колебания маятника $T = 16{,}4$ с. Тяжелый шар маятника имел снизу острие, которое при каждом размахе прочерчивало полосу на горке песка, насыпанной по краю круглого помоста под маятником на расстоянии 4 м от центра — точки равновесия маятника. За 16,4 с Земля поворачивается на 4,1′ и на столько поворачивалась бы плоскость качаний маятника на полюсе. Для Парижа эту величину нужно помножить на $\sin\varphi$, что дает 3,09′ или в долях радиуса 0,00898 и при $r = 4000$ мм равно 3,6 мм — вполне заметная величина.

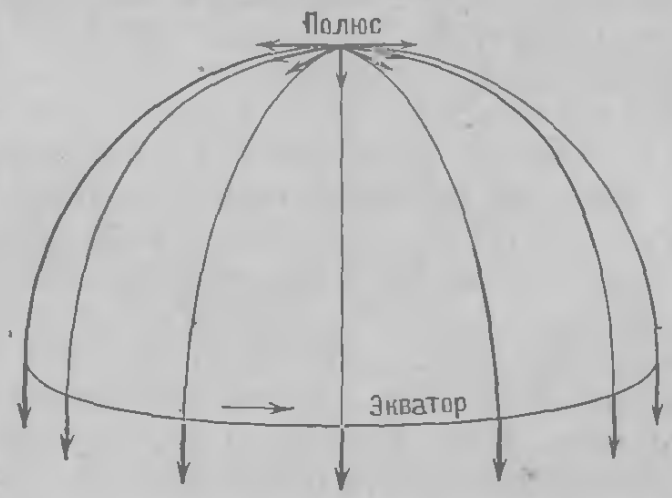


Рис. 7. Вращение меридиана на полюсе и перенос на экваторе.

На столько поворачивалась плоскость колебаний маятника при каждом полном размахе, и его острие прочерчивало на песке каждый раз новую канавку, что было хорошо видно многочисленным зрителям, присутствовавшим при первом опыте в парижском Пантеоне (рис. 8).

С тех пор маятник Фуко демонстрировался много раз в различных местах и даже в лабораторных условиях. Но наиболее впечатляющим является маятник, демонстрируемый в Исаакиевском соборе в Ленинграде. Его длина составляет 98 м, и благодаря большой географической широте, равной 60°, он совершает полный оборот за 27,7 ч при периоде качаний в 19,8 с. Здесь при каждом размахе он отступает на 4,3′, т. е. в 1,4 раза больше, чем при первом опыте Фуко в парижском Пантеоне.

Фуко еще высказал мысль об использовании гироскопа, т. е. быстро вращающегося твердого тела, для обнаружения вращения Земли. Если гироскоп устроен

так, что его ось вращения может принимать в пространстве любое направление, то на вращающейся Земле он будет стремиться занять такое положение, чтобы его ось вращения стала параллельной земной оси. На этом принципе впоследствии был построен гирокомпас, указывающий направление географического меридиана, а не магнитного, как обыкновенный компас. Гирокомпас ныне имеет широкое и важное применение в навигации и особенно в авиации.

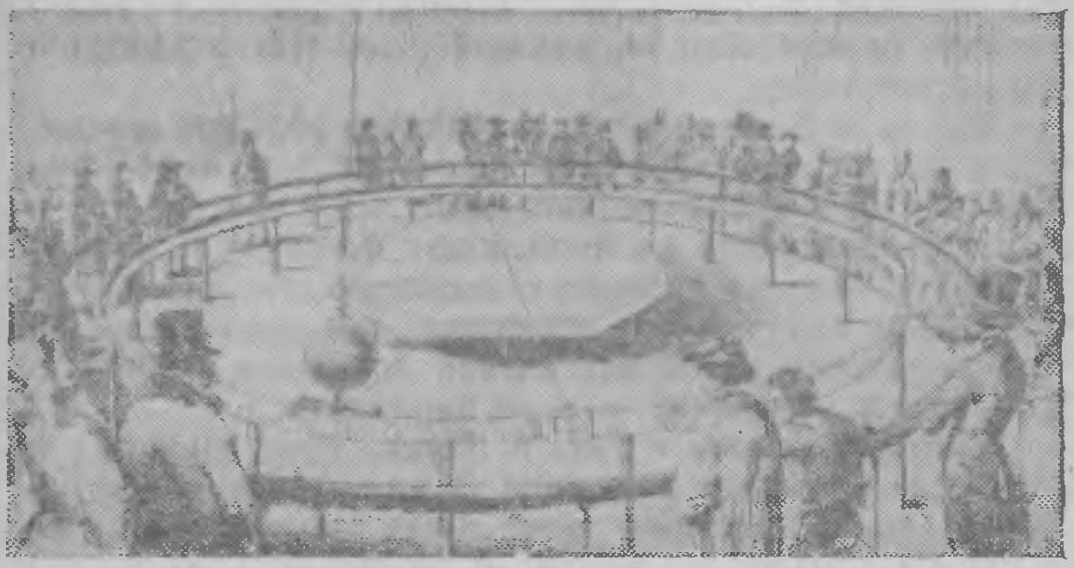


Рис. 8. Первая демонстрация маятника Фуко в парижском Пантеоне в 1851 г. (по старой гравюре).

Вращение Земли влияет на движения тел на земной поверхности, такие как перемещение масс воздуха при ветре, течение воды в реках. Представим себе тело, движущееся в наших средних широтах по меридиану с севера на юг. В своем начальном положении, скажем на широте $+60°$, его скорость переноса вращением Земли в 2 раза меньше, чем на экваторе, так как на такой широте радиус параллели, пропорциональный косинусу широты, в 2 раза меньше радиуса экватора. По инерции движущееся по меридиану тело стремится сохранить первоначальную скорость переноса, направленную в сторону вращения Земли, т. е. с запада на восток. Двигаясь на юг, ближе к экватору, тело попадает в места, имеющие бóльшую скорость переноса, и поэтому отстает от них, а так как вращение Земли стремится увлечь его на восток, то, отставая от него, тело отклоняется к западу. Но при движении на юг, запад находится

с правой стороны, поэтому отклонение движущегося тела происходит вправо от направления движения.

Такой же результат получится и для тела, движущегося по меридиану с юга на север. Вместо отставания от скорости вращения Земли происходит упреждение, т. е. стремление отклониться к востоку, что опять будет вправо от направления движения. Перемена знака отклонения происходит на экваторе, где линейная скорость максимальная и на некотором участке почти постоянная, так как косинус близ нуля градусов меняется очень медленно и поэтому скорость переноса тоже с широтой практически не меняется, так что отклонение здесь отсутствует.

Обычно при объяснении описанного явления ограничиваются случаем движения по меридиану, игнорируя движение по параллели или даже предполагая, что в этом случае вообще не происходит отклонения движущихся тел. Однако правило отклонения остается в силе при любом направлении движения, для доказательства чего достаточно разобрать случай движения, перпендикулярного к меридиану, т. е. по параллели.

Обратимся вновь к рис. 6. Пусть тело движется к востоку — в сторону вращения Земли. Тогда к центробежной силе, присущей всем телам, участвующим во вращении Земли, и входящей небольшой составной частью в силу тяжести, прибавится еще очень малая доля центробежной силы, направленной перпендикулярно к земной оси и поэтому лежащей в плоскости параллели, как показано на рисунке. Разложим эту добавочную силу на две составляющие, одну — направленную вертикально вверх, которая немного уменьшит вес движущегося тела, и другую по горизонтали — касательно к земному шару (в данном случае можно пренебречь сплюснутостью Земли). Эта горизонтальная составляющая направлена по меридиану к югу, т. е. вправо от направления движения.

Если тело движется на запад, в сторону, противоположную вращению Земли, то это уменьшит составляющую центробежной силы, что можно рассматривать как приложение очень малой центростремительной силы, направленной перпендикулярно к оси вращения Земли. Разлагая эту силу на вертикальную составляющую, направленную к центру Земли и немного увеличивающую вес тела, и на горизонтальную, направленную на этот раз к северу, получаем отклонение опять вправо от на-

правления движения. Очевидно, что на экваторе в обоих случаях горизонтальная составляющая отсутствует, так как центробежная сила здесь направлена целиком по вертикали. В южном полушарии правило отклонения будет обратным.

Таким образом, не только сохраняется стремление движущихся тел отклоняться в правую сторону в северном полушарии, но вычисление показывает, что и количественная сторона этого явления не зависит от направления движения, будучи одинаковой как при движении по меридиану, так и по параллели или в промежуточном направлении, что является следствием общего закона движения по поверхности вращающегося тела, открытого французским ученым Г. Кориолисом в 30-х годах прошлого столетия и носящего его имя.

Описанное свойство движущихся тел на вращающейся Земле проявляется в ряде явлений. Как подметил в 1857 г. русский академик К. М. Бэр, большие и полноводные реки стремятся отклониться в своем течении вправо, сильнее подмывая правый берег, который поэтому бывает более крутым. Это стремление проявляется и в движении воздушных масс и приводит к образованию пассатных ветров и циклонов, а также влияет на морские течения. Такое же отклонение происходит и при полете артиллерийских снарядов, и даже на железных дорогах, если по одной колее движение происходит только в одном направлении, сильнее изнашивается правый рельс.

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ И ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Время измеряется с помощью периодических процессов, совершающихся по возможности в постоянных и неизменных условиях, а потому и одинаковой продолжительности. Таковы, например, колебания маятника, которые голландский физик Х. Гюйгенс в 1656 г. применил в изобретенных им столовых и стенных часах. Таковы и крутильные колебания балансира, свободные от силы тяжести, в карманных часах, а также вибрации кристалла кварца в электронных часах. Механизм часов нужен для поддержания колебаний, чтобы они не затухли, для счета этих колебаний и переноса их на стрелки циферблата.

Однако каким бы способом ни измерялось время, это измерение должно быть для всех практических

нужд согласовано с вращением Земли, производящим смену дня и ночи и этим регулирующим всю нашу жизнь. Это вращение совершается с большой равномерностью, более чем достаточной для всех житейских потребностей и большинства научных и технических применений. Но при этом прежде всего возникает вопрос, относительно чего или по какой метке определить вращение Земли? Казалось бы, что такая метка должна быть неподвижной, но относительно чего? Метка может быть неподвижна относительно направления к какой-нибудь далекой звезде, практически сохраняющей его относительно Земли, но тогда измерение времени разошлось бы с Солнцем, направление к которому меняется в течение года, а потому потерялась бы согласованность со сменой дня и ночи.

Описывая это явление, приведем такое сравнение. Представим себе соревнование по бегу на дистанцию 500 м, соответствующую одному обороту на круглом стадионе. Пусть дан старт, но во время бега метка финиша была сдвинута вперед по направлению бега на 50 м. Тогда, после пробега одного полного круга, состязающимся придется дополнительно пробежать те 50 м, на которые передвинут финиш. Пусть старт каждого следующего забега дается там, где был финиш предыдущего, который каждый раз передвигался на 50 м. Тогда через десять забегов старт окажется в первоначальном месте, но число оборотов, которые бегуны пробежали по стадиону, окажется равным одиннадцати, так как один дополнительный оборот они пробежали, преследуя передвигавшийся финиш.

Нечто подобное происходит и с вращением Земли, если обороты считать относительно Солнца, направление на которое ежедневно меняется почти на один градус. За сутки Земля совершает один оборот вокруг своей оси, но и продвигается по своей орбите, и поэтому, чтобы стать к Солнцу точно прежней стороной, она должна еще дополнительно повернуться на тот угол, который она прошла по орбите. Отсюда возникли две единицы для измерения времени: период вращения Земли относительно далеких и поэтому «неподвижных» звезд, называемый звездными сутками (время, измеряемое ими, называется звездным временем), и период вращения Земли относительно Солнца, определяющий солнечные сутки и солнечное время. Отсюда и год, связанный с изменением времен года и называемый тропи-

ческим, содержит 366,2422 звездных суток, подобно нашему примеру с бегунами на стадионе. Но дальше мы еще уточним эти понятия.

Итак, мы получили две разные единицы для измерения времени, именно звездные сутки или полный оборот Земли относительно столь далеких меток — звезд, на видимом положении которых орбитальное движение Земли не производит заметных изменений, и солнечные сутки или полный оборот Земли относительно Солнца. И те, и другие сутки подразделяются на 24 ч, или 1440 мин, или 86 400 с.

Все было бы так просто, если бы движение Земли происходило по круговой орбите и равномерно и, кроме того, земная ось вращения была бы перпендикулярна к плоскости ее орбиты. В действительности, вследствие эллиптичности земной орбиты, движение Земли неравномерно и, согласно второму закону Кеплера, происходит быстрее зимой близ перигелия, т. е. в ближайшей к Солнцу точке, которую Земля проходит ежегодно около 4 января, когда она за солнечные сутки передвигается на 61,1′, по отношению к направлению к Солнцу, и медленнее летом близ афелия, около 4 июля, где ее суточное движение составляет 57,2′. Поэтому и солнечные сутки, будем называть их истинными, не одинаковой длины — зимой они длиннее, а летом короче. Вместе с тем и промежуток между двумя полуднями изменяется от 23 ч 59 мин 42 с до 24 ч 0 мин 31 с. Происходящая вследствие эллиптичности земной орбиты неравномерность истинных солнечных суток в течение года довольно хорошо представляется синусоидой с амплитудой 7,6 мин и начальной фазой в перигелии 4 января. Эта неравномерность исключается добавлением к истинному солнечному времени с соответствующим знаком поправки $7{,}6 \sin 0{,}986^\circ\ (n - 4)$ минут, где n есть порядковый номер дня в году, начиная с 1 января.

В предыдущей формуле множитель 0,986 введен для того, чтобы за год в 365,25 суток аргумент изменялся ровно на 360°, так как с точностью до трех знаков $360/365{,}25 = 0{,}986$. Что касается общего коэффициента 7,6, то он определяется эксцентриситетом земной орбиты, от которого зависит неравномерность орбитального движения Земли.

Существует еще другая причина неравномерности истинного солнечного времени. Это — наклон земной

оси к плоскости ее орбиты, равный 66,5°. Вследствие этого равные части эклиптики, по которой совершается видимое годичное движение Солнца по небесной сфере, в проекции на экватор дают неравные отрезки, как это пояснено на рис. 9. Это явление повторяется два раза в году при движении Солнца от весеннего равноденствия к осеннему и затем от осеннего равноденствия к весеннему в следующем году. Амплитуда

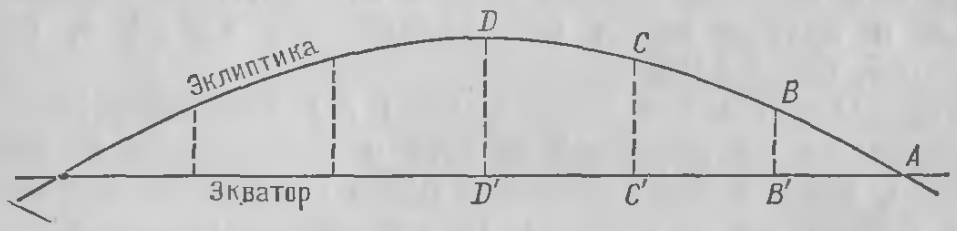


Рис. 9. Равные дуги эклиптики в проекции на экватор дают неравные отрезки: $AB = BC = CD$, но $AB' < B'C' < C'D'$.

этого колебания составляет 9,8 мин времени с периодом в полгода, тогда такое колебание можно записать в виде $9{,}8 \sin 1{,}973° (n - 81)$, где множитель перед n удвоен для того, чтобы аргумент за год дважды пробегал окружность, а 81 есть порядковый номер дня весеннего равноденствия, от которого начинается учитываемая неравномерность.

Суммируя эти два действия, т. е. прибавляя член, учитывающий неравномерность движения Земли по орбите, и вычитая эффект проекции на экватор движения Солнца по эклиптике, получаем так называемое уравнение времени

$$\eta = 7{,}6 \sin 0{,}986° (n - 4) - 9{,}8 \sin 1{,}973° (n - 81).$$

В результате прибавления значения, полученного из уравнения времени, к истинному солнечному времени, которое дается, например, солнечными часами (рис. 10) или более точными астрономическими наблюдениями, получается среднее солнечное время, текущее равномерно, по которому идут наши часы и которое регулирует нашу жизнь. Общий вид уравнения времени показан на рис. 11.

В течение года уравнение времени четыре раза бывает равным нулю, именно около 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 25 октября. Мы говорим «около», так как год не содержит целого числа суток и поэтому в пределах одного-двух дней указанные даты могут изменяться. Также четыре раза в году уравнение времени достигает

крайних значений, что бывает около 11 февраля (+14,3 мин), 15 мая (—3,7 мин), 26 июля (+6,4 мин) и 3 ноября (— 16,4 мин).

Уравнение времени изменяется быстрее всего в декабре — до 30 с в сутки. В эти дни настолько запаздывает истинный полдень по отношению к среднему, что имеет любопытное последствие. Самый короткий день в северном полушарии бывает в день зимнего солнцестояния 22 или 23 декабря. До этого продолжительность дня очень медленно убывает, а после начинает столь же медленно увеличиваться. Уменьшение дня происходит и утром, когда восход Солнца запаздывает, и вечером, когда Солнце раньше заходит. Моменты восхода и захода Солнца симметричны относительно истинного полдня, но ежедневно запаздывают от-

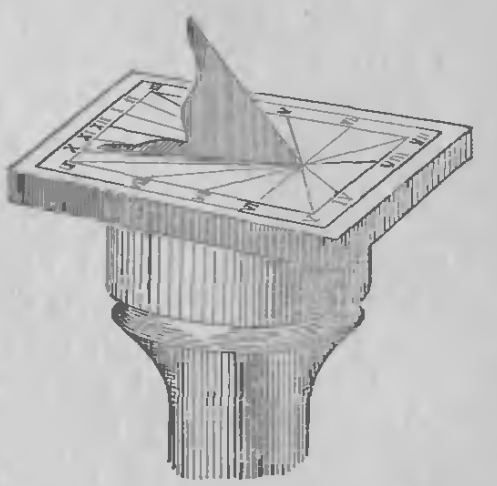


Рис. 10. Солнечные часы.

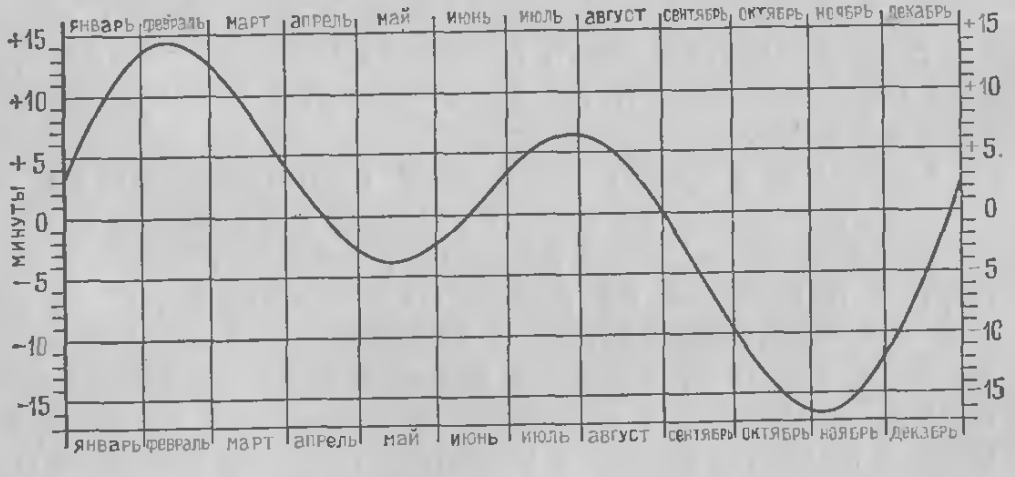


Рис. 11. График уравнения времени.

носительно среднего полдня. Поэтому перед днем зимнего солнцестояния запаздывание восхода Солнца по нашим часам складывается из действительного запаздывания и сдвига истинного полдня на более позднее время. Вечером же, наоборот, против более раннего захода действует смещение истинного полдня и в течение нескольких дней его превосходит. В результате восход Солнца

по среднему времени еще на несколько дней запаздывает после солнцестояния, а вся прибавка дня падает на заход вечером. Так, например, на широте Москвы самый поздний восход Солнца бывает 28 декабря, а самый ранний заход — 15 декабря.

Еще раз напомним, что все приведенные даты могут из года в год изменяться на один-два дня из-за включения високосных годов в наш календарь. Точные значения уравнения времени до долей секунды сообщаются в астрономических ежегодниках и календарях.

Таким образом, можно сказать, что момент полдня определяется не по прохождению через меридиан данного места истинного Солнца, а по кульминации некоторой воображаемой, фиктивной точки, которая в течение года равномерно движется по небесному экватору, т. е. большому кругу небесной сферы, перпендикулярному к земной оси. Эта точка, называемая *средним солнцем,* проходит через точку весеннего равноденствия, в которой эклиптика пересекается с экватором, одновременно с истинным Солнцем. Вращение Земли относительно этой фиктивной точки служит для измерения равномерно текущего среднего солнечного времени, по которому ходят наши часы. Промежуток времени между двумя последовательными кульминациями этой точки определяет продолжительность средних солнечных суток, которые подразделяются на часы, минуты и секунды среднего времени.

Средний полдень наступает одновременно во всех местах, лежащих на одном земном меридиане, и вследствие вращения Земли переходит с одного меридиана на другой с востока на запад со скоростью 15° за один час времени, обегая таким образом всю Землю кругом за 24 ч. Поэтому каждый меридиан имеет свое среднее время, называемое местным и зависящее от географической долготы данного места. В старину каждый город жил по своему местному времени. Например, в Москве, лежащей на 7,25° восточнее Петербурга, время считалось на 29 мин вперед, чем в Петербурге, лежащем на меридиане Пулковской обсерватории, расположенной немного южнее города. Такое Петербургское, точнее Пулковское, время во избежание путаницы и ошибок было введено во всей России на железных дорогах и телеграфе.

В странах, не сильно растянутых по долготе, можно было без больших неудобств считать единое время,

обычно совпадающее с местным временем столицы. Так было, например, в Англии, Франции, Германии и ряде других небольших стран. Но в Соединенных Штатах Америки местное время в Калифорнии на западном побережье на 4 ч отставало от восточных штатов, а на железных дорогах расписание составлялось по местному времени того города, в котором находилось управление дороги. Вследствие этого бывали случаи, когда в одном городе поезда отправлялись на запад по другому времени, чем на восток. Чтобы устранить это неудобство, было введено поясное время, для чего страна была разделена меридианами через 15° долготы, и в каждой полосе считалось единое время меридиана, лежащего посредине между граничными данной полосы. За начальный средний меридиан по международному соглашению был принят меридиан, проходящий через пассажный инструмент Гринвичской обсерватории, находящейся на восточной окраине Лондона. Этот меридиан стал исходным и определяющим нулевой пояс с границами по 7,5° к востоку и к западу от него. Местное среднее солнечное время Гринвичской обсерватории называется мировым или всемирным временем.

Счет часов поясов ведется к востоку, и их граничные меридианы имеют долготу 7,5°, 22,5°, 37,5° и т. д. через каждые 15°. Последний, 23-й пояс имеет граничные меридианы с западными долготами 22,5° и 7,5°.

Самую большую протяженность в долготном направлении имеет Советский Союз, на территорию которого приходятся 11 часовых поясов, от второго на западе до двенадцатого на Чукотке. Счисление времени по часовым поясам было введено у нас декретом Совета Народных Комиссаров в 1919 г.

Однако проводить границы часовых поясов в населенных местностях строго по меридианам было бы крайне неудобно, так как пришлось бы делить отдельные области или районы на части. Поэтому границы поясов проводят применительно к административному делению или к естественным рубежам, например, большим рекам или горным хребтам, но по возможности ближе к граничным меридианам. Так, если проводить границу между вторым и третьим поясами строго по меридиану 37,5°, то бóльшая часть Москвы попала бы в третий пояс, а ее западные пригороды оказались бы во втором. Во избежание этого вся Москва и Московская область отнесены ко второму поясу, в котором находится также

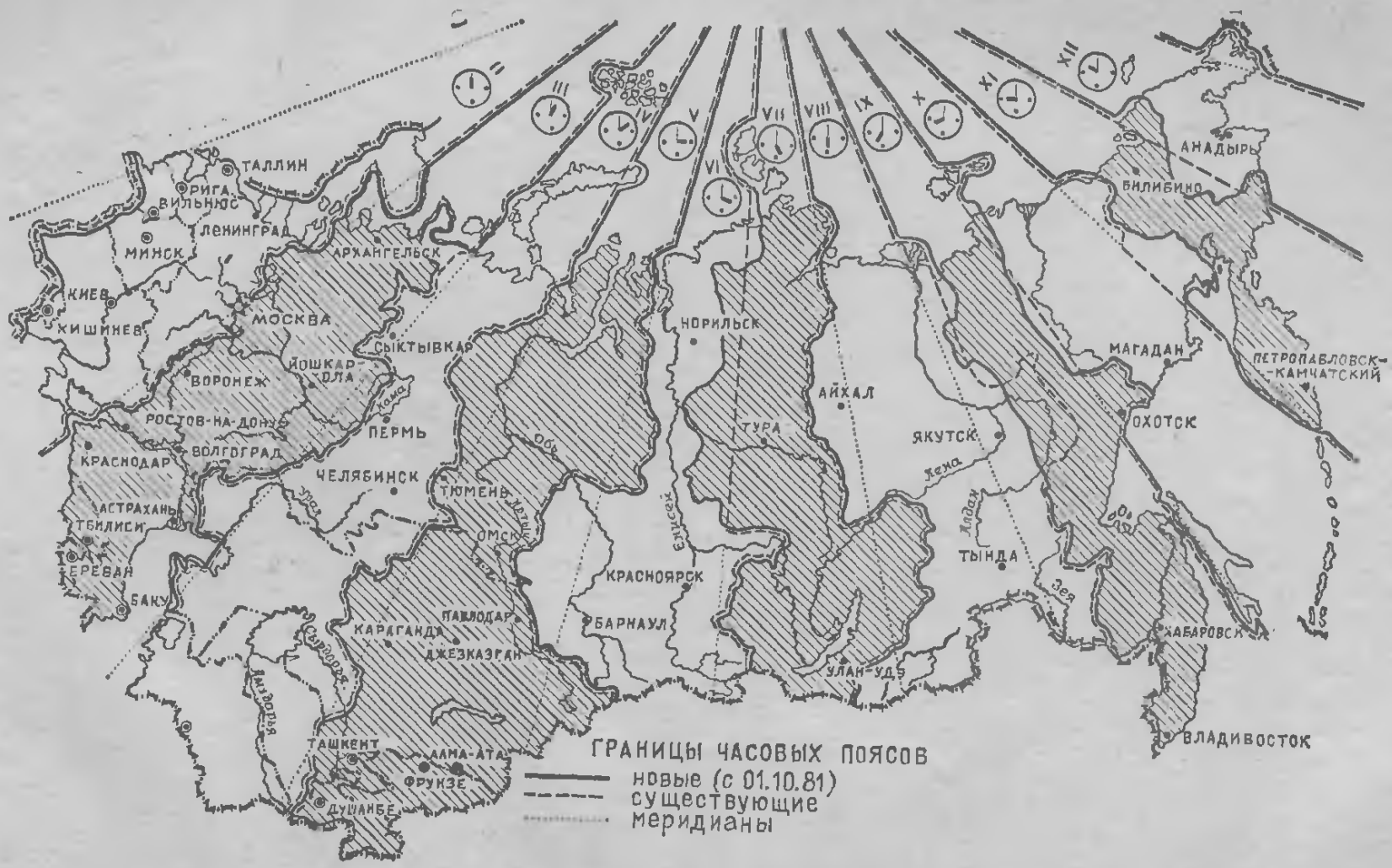


Рис. 12. Карта часовых поясов.

Ленинград и вся западная часть СССР до государственной границы. В 1930 г. для экономии электроэнергии часы повсеместно были передвинуты на один час вперед, и такое время стало называться декретным. Начиная с 1981 г. ежегодно с 1 апреля и до 1 октября прибавляется еще один час, чем вводится декретное летнее время. Карта часовых поясов в СССР приведена на рис. 12.

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ И МОРСКИЕ ПРИЛИВЫ

До недавнего времени вращение Земли считалось абсолютно равномерным, хотя еще в 1754 г. немецкий философ И. Кант указал на явление, которое могло замедлить это вращение, именно на морские приливы.

Цивилизованные народы античного мира, жившие в землях, не граничащих с океаном, были мало знакомы с явлением приливов. Лишь воины Александра Македонского в III веке до н. э. встретились с этим явлением во время похода в Индию, о чем повествует римский историк Курциус Руф. Приводим перевод его описания.

«Преодолевая противоположное течение морского прилива, они медленно продвигались дальше и, достигши острова посреди моря, они бросили якорь и рассеялись по острову в поисках за провиантом, не подозревая о том событии, которое ожидало их, несведущих.

Был третий час, когда океан своими постоянными сменами прилива и отлива стал надвигаться и заливать реку. Образовалась запруда, но дальнейший напор океана еще больше погнал реку назад и она с огромной силой потекла в противоположном направлении, падая, подобно водопаду, по покатому руслу. Толпе была незнакома природа моря, и она увидела в этом чудо и знамение гнева богов. Вода же с большей силой стала заливать поля, бывшие только что свободными от воды. Вот корабли появились на хребтах волн и весь флот рассеялся в разные стороны. В это время со всех сторон стали стекаться к берегу испуганные люди, пришедшие в ужас от неожиданного несчастья. Но в сумятице и поспешность не помогает. Одни стали веслами толкать корабли к берегу, другие же хотели ехать и мешали установке руля. Некоторые, спеша отъехать от берега, не

дождались своих товарищей и теперь с трудом приводили в движение неуклюжие и трудно управляемые корабли. На другие корабли в отчаянии бросилось слишком много людей, и в то время, как на одних кораблях было слишком мало людей, другие были слишком переполнены. Крики оставленных, просивших подождать, и крики на кораблях, требующие, чтобы отчаливали,— все смешалось в одно, лишая всех возможности видеть и слышать что-нибудь. Даже от рулевых не было ни малейшей помощи, так как ни крики их не доходили до ушей безумствующих, ни приказания их не исполнялись испуганными и смущенными. Корабли стали поэтому наталкиваться друг на друга, ломать друг у друга весла, и один корабль наскакивал на другой. Можно было бы подумать, что это не флот одного и того же войска, а два различных флота, столкнувшиеся в морском сражении. Передние части одних кораблей ударялись в задние части других, те, которые только что внесли сумятицу в одни ряды, сейчас же видели себя вытесненными последующими за ними, и гнев спорящих скоро вылился в рукопашную схватку.

Но вот прилив залил все поля, так что одни только вершины их выступали подобно маленьким островкам; к ним в страхе стали спешить очень многие, потеряв надежду добраться до кораблей. Часть флота находилась там, где вода была глубока, где до прилива были долины, часть сидела на мели там, где волны едва покрывали возвышения. Но вдруг случилось нечто новое и еще более ужасное: море стало отступать, воды длинными рядами волн стали возвращаться к своему месту и снова обнажать только что залитую землю. Корабли, оставленные водой, стали ударяться друг о друга и некоторые легли набок; поля были покрыты вещами, оружием и обломками оторванных досок и весел. Солдаты не смели ни ступить на берег, ни оставаться на кораблях, все еще дожидаясь дальнейшего и худшего. Они едва верили своим глазам: кораблекрушение на суше, течение на море. Несчастью не видно было конца: не зная того, что новый прилив скоро вернет и воды, и снимет корабли с мели, они опасались голода и величайшей нужды. Там и сям ползали страшные животные, оставленные волнами.

Наступила ночь, и сам Александр был глубоко опечален, отчаявшись в спасении. Но эти заботы не осилили его непобедимой смелости, и он всю ночь оставался

на вершине горы и выслал всадников к истоку реки с приказанием, как только они увидят новый прилив моря, поспешить к нему. Приказал он также разбитые корабли снова исправить, перевернутые волнами поставить прямо и быть готовыми к тому времени, когда море снова зальет сушу. Так провел он всю ночь, бодрствуя и побуждая к деятельности, как вдруг прискакали всадники и вслед за ними столь же быстро поспел прилив. Сначала мелкие и слабые волны стали снимать корабли, но вскоре все поля снова были залиты водой и весь флот был приведен в движение. По всему берегу раздался гром рукоплесканий солдат и моряков, безмерно радовавшихся своему спасению, в котором они уже отчаялись. Откуда же, спрашивали они в изумлении, так внезапно вернулся этот огромный морской прилив? Куда он вчера исчез? И что же это за элемент, то никому не покорный, то подчиненный закону определенных времен? Полагая на основании происшедшего, что после захода солнца наступит момент прилива, Александр сейчас же после полуночи выехал с немногими кораблями вдоль по реке, чтобы предупредить прилив. Оставив позади себя устье реки, он увидел себя, наконец, у цели своих стремлений и проехал дальше по морю четыреста стадий. Здесь он принес жертву божествам моря и той местности и вернулся обратно к флоту».

Таково красочное описание одного из первых знакомств античного мира с явлением прилива у берегов океана. Морские приливы не только любопытное явление, но они имеют большое значение для мореплавания. Поэтому их изучением занимались многие ученые и навигаторы, тем более что приливы проявляются весьма различно в разных местах.

Давно было замечено, что приливы каким-то образом связаны с фазами Луны, причем наибольшей высоты они достигают во время новолуний и полнолуний, но причина их не была известна. Лишь в конце XVII века Ньютон объяснил происхождение приливов и дал их первую теорию. Поясним основу этих явлений.

Представим себе тело, на все части которого действуют одинаковые и параллельные силы. Под их влиянием тело придет в движение как одно целое, не испытывая никаких деформаций. Но если действующие силы не вполне одинаковы, а на одни части тела действуют сильнее, а на другие слабее, или по слегка разным направлениям, то, помимо общего движения, тело

будет испытывать некоторую деформацию, которая определится разностью сил, действующих на отдельные части тела.

Применим это рассуждение к силам притяжения Земли далеким внешним телом, например, Солнцем или Луной. Обозначим через R расстояние такого притягивающего тела массы M от центра Земли и через r — радиус земного шара, который мал по сравнению с расстоянием R. Рассмотрим на поверхности Земли ближайшую к притягивающему телу точку, расстояние до которой равно $R-r$, и другую в центре Земли и вычислим разность притяжения этих точек. Опуская множитель пропорциональности и принимая массу точек за единицу, получим для этой разности

$$\frac{M}{(R-r)^2} - \frac{M}{R^2} = M\,\frac{R^2-(R-r)^2}{R^2\,(R-r)^2}.$$

Раскрывая скобки и отбрасывая малые члены, найдем

$$2M\,\frac{r}{R^3}.$$

Отсюда следует, что разность притяжения обратно пропорциональна кубу расстояния до притягивающего тела. Проделав такое же вычисление для притяжения точки на обратной стороне Земли, расстояние которой от притягивающего тела равно $R+r$, мы получили бы такой же результат, но с обратным знаком, что означает стремление этой точки удалиться от притягивающего тела, а следовательно и от центра Земли.

Найденная нами разность притяжений и есть та сила, которая производит приливы, и поэтому она называется приливообразующей силой. Сравним величины этих сил, вызываемых притяжением Солнца и Луны. Для упрощения вычислений примем за единицу среднее расстояние Луны от Земли, а также массу Земли. Тогда для Солнца будем с округлением иметь $R = 390$ (таково отношение расстояний до Солнца и Луны) и $M = 333\,000$. Для Луны $R = 1$ и $M = 1/81{,}3$. Для Земли $r = 1/60$. Выполняя с этими значениями вычисления, найдем с небольшим округлением приливообразующие силы:

$$\text{для Солнца } 2\,\frac{333\,000}{390^3}\cdot\frac{1}{60} = 0{,}0001871;$$

$$\text{для Луны } 2\left(\frac{1}{81{,}3}\right)\cdot\frac{1}{60} = 0{,}0004100.$$

Отношение этих сил равно 1 : 2,19, т. е. действие Луны почти в 2,2 раза сильнее, чем Солнца. Очевидно, что огромная масса Солнца по сравнению с Луной здесь более чем компенсируется его большим расстоянием, которое влияет обратно пропорционально кубу.

Подсчитаем, какую долю эти приливообразующие силы составляют от силы земного тяготения. В тех же единицах и опять опуская постоянную тяготения, получим для притяжения Землей точки на ее поверхности, принимая радиус земного шара в 60 раз меньше расстояния до Луны:

$$1/r^2 = 1 : (1/60)^2 = 3600.$$

Для Луны мы уже имели 0,00041. Отношение этих чисел равно 8 780 000 или круглым счетом девять миллионов. На такую ничтожную величину — одну девятимиллионную долю уменьшается сила земного притяжения или, что почти то же самое, и сила тяжести. Лишь самые точные приборы, называемые гравиметрами, могут почувствовать это действие Луны.

Таково уменьшение силы тяжести, когда Луна находится в зените данной точки на Земле. Можно сказать, что Луна оттягивает эту точку от Земли. Обратное происходит в противоположной точке, где Луна находится в надире — там Луна оттягивает Землю от этой точки. Результат получается один и тот же — сила тяжести также уменьшается, только чуть-чуть меньше из-за того, что расстояния этих точек от Луны слегка различны. В точке, где Луна в зените, оно равно $R-r$, а где в надире — $R+r$. Первая точка ближе, а потому и действие Луны на нее сильнее. Это различие тем меньше, чем дальше притягивающее тело, так что для Солнца оно совсем незаметно.

Итак, приливообразующая сила в двух рассмотренных нами точках, где Луна находится в зените и надире, направлена вверх и уменьшает силу тяжести, но столь незначительно, что никакого заметного действия не производит. Посмотрим, что будет во всех других точках земной поверхности. В каждой из них приливные силы равны разности притяжения Луны или Солнца данной точки и центра Земли. Для получения этой разности нужно по правилу параллелограмма найти равнодействующую между силой притяжения данной точки и перенесенной к ней в обратном направлении силой притяжения центра, как пояснено на рис. 13.

Выполнив такое построение для разных точек, получим распределение приливных сил, изображенное на рис. 14. Здесь главную роль играют силы, направленные по касательной к поверхности Земли, т. е. горизонтальные,

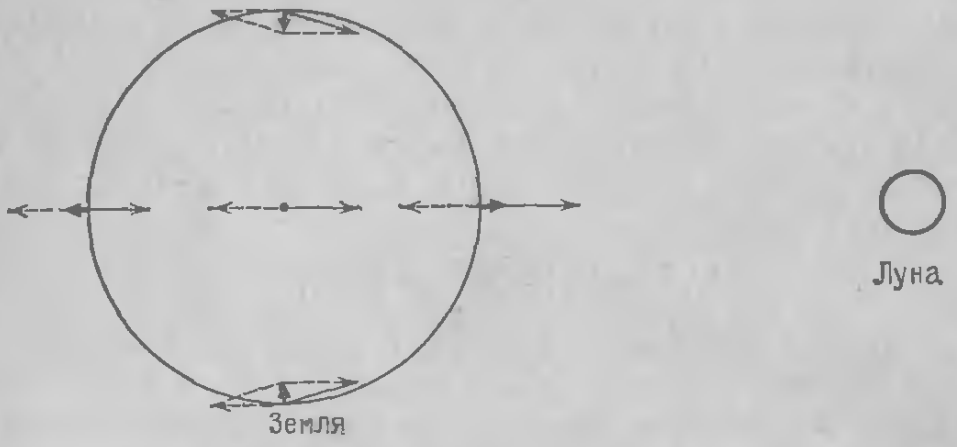


Рис. 13. Приливообразующие силы (жирные стрелки) являются геометрической разностью между притяжениями Луной точек земной поверхности и центра Земли.

которые сгоняют в океане воду в направлении подлунной и ей противоположной точек, образуя в них поднятие воды или прилив. Так было бы, если бы Земля не

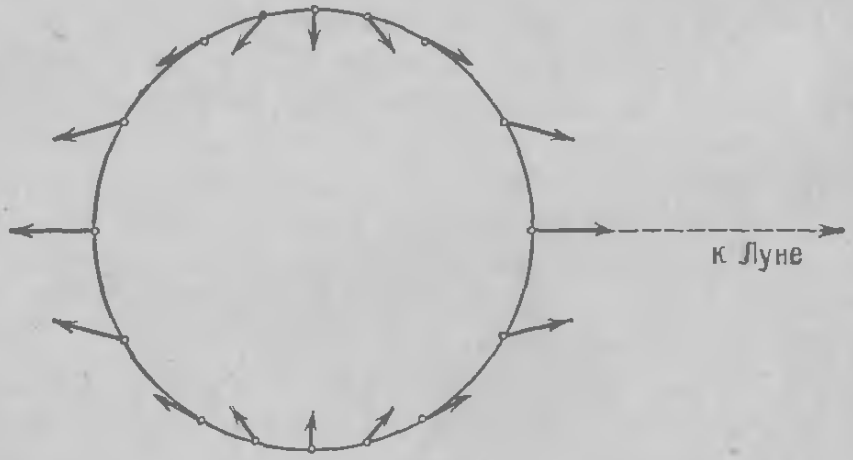


Рис. 14. Распределение приливообразующих сил.

вращалась и была покрыта глубоким океаном. Но вращение Земли и движение Луны непрерывно смещают подлунные точки и заставляют приливную волну бежать вслед за Луной, встречая препятствия в виде материков и отмелей. То же происходит и с приливом, вызванным притяжением Солнца, что сильно запутывает и осложняет картину.

Луна совершает по небу в течение года около 13,5 оборотов и ежесуточно сдвигается почти на 13°, запаздывая вследствие этого примерно на 52 мин в сутки. Поэтому вращение Земли относительно Луны совершается со средним периодом около 24 ч 52 мин среднего солнечного времени, который называется лунными сутками. За это время бывает два прилива, и между ними в среднем протекает 12 ч 26 мин. Солнечные приливы бывают два раза в солнечные сутки и поэтому чере-



Рис. 15. Вид Мурманской бухты в день солнечного затмения 8 апреля 1921 г., когда приливообразующие силы Луны и Солнца складывались (фото автора).

дуются через 12 ч 00 мин. Отсюда следует, что, налагаясь один на другой, лунные и солнечные приливы могут взаимно усиливаться или уменьшаться в зависимости от фаз Луны. В новолуние Луна и Солнце находятся почти в одном направлении от Земли, и их приливы суммируются, производя особо высокий подъем воды. Через семь дней наступает первая четверть, и угловое расстояние Луны от Солнца составляет 90°, лунный прилив совпадает с солнечным отливом и подъем воды бывает наименьшим. Еще через 7—8 дней наступает полнолуние и приливы опять суммируются, и, наконец, в последнюю четверть Луны они опять вычитаются, лунный прилив действует сильнее, чем солнечный отлив (рис. 15).

Если высоту лунного прилива принять за единицу, то солнечные приливы в 2,2 раза меньше и составляют 45% от лунных. Тогда во время новолуний и полнолуний, называемых сизигиями (от греческого слова, означающего соединение), высота приливов будет около $1 + 0{,}45 = 1{,}45$, а во время квадратур Луны $1 - 0{,}45 = 0{,}55$, т. е. почти в 3 раза меньше. Однако такой подсчет слишком неточен, прежде всего из-за того, что расстояния этих светил от Земли вследствие эллиптичности орбит Земли и Луны подвержены изменениям — Земли до 3,3% и Луны до 11%, а так как приливная сила зависит от куба расстояния, то солнечные приливы могут изменяться в пределах 10%, а лунные до 33%, что сильно разнообразит высоту приливов. Нужно еще принять во внимание, что Солнце может отходить от экватора на 23,5°, а Луна даже на 28°, что еще осложняет дело.

Вследствие указанных причин приливы бывают весьма разнообразны. Высота прилива особенно сильно зависит от очертания берегов и рельефа дна мелких морей, которые препятствуют свободному распространению прилива. В открытом океане высота приливов не превосходит одного метра, но в заливах и в узких проливах приливы достигают большой высоты. Вот несколько примеров: Залив Фанди в Новой Шотландии (Северная Америка) — до 19,6 м; Гранвиль у Ла-Манша во Франции — 14,7 м; устье реки Колорадо в Калифорнии — 12,3 м.

Своеобразное и довольно грозное явление происходит в некоторых устьях рек, когда набегающий прилив бурно распространяется вверх по реке, преодолевая ее течение. Особенно большой величины это явление, называемое бурой, наблюдается в устье реки Амазонки, где волна с крутым фронтом, до 5 м высоты, бежит против течения реки со скоростью до 8 м/с. Это явление бывает особенно опасно для судов. Именно с таким явлением и встретились воины Александра Македонского, как описано Курциусом Руфом.

Для мореплавания чрезвычайно важно знать, когда и какая будет высота прилива в той или иной гавани, куда бывает доступ кораблей только при определенной высоте прилива. Поэтому этим вопросом занимались многие математики, гидрологи и астрономы. Запись прошлых приливов в данной гавани служит им для анализа. Сопоставляя высоту приливов с положением Солн-

ца и Луны и разлагая запись на отдельные синусоидальные волны, с периодами, зависящими от движения этих светил, можно выделить влияние той или другой причины. Были изобретены специальные машины, состоящие из ряда кривошипов с блоками, которые устанавливаются сообразно с данными анализа, чтобы вращаясь, воспроизводить волны с их амплитудами и периодами. Шнур или цепь, опоясывающая блоки, суммирует волны, и штифт на конце вычерчивает на рулоне бумаги высоты предстоящих приливов (рис. 16).

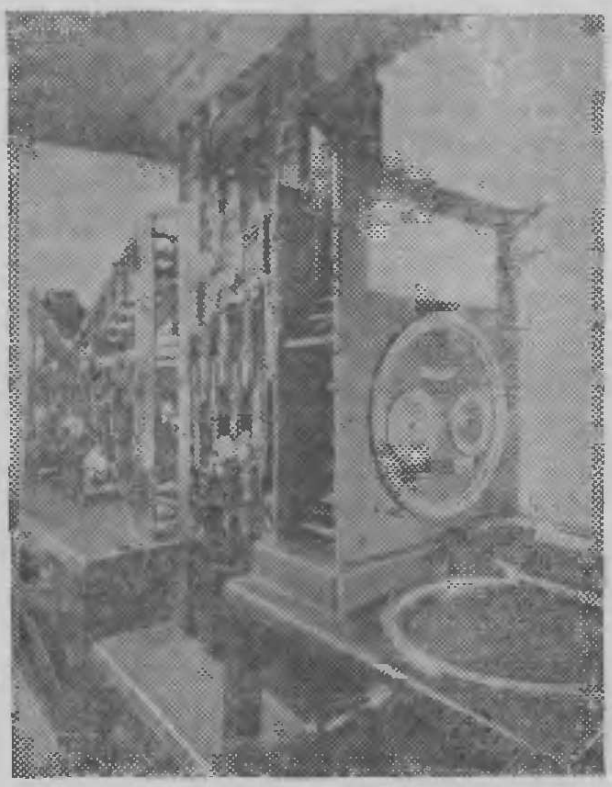


Рис. 16. Приливная машина береговой службы США.

В настоящее время подобные вычисления выполняются с помощью ЭВМ.

Мы остановились столь подробно на явлении морских приливов, потому что они имеют определенное влияние на вращение Земли. Немецкий философ И. Кант еще в 1754 г. высказал мысль, что приливы, обегая за сутки вокруг Земли в направлении, противоположном ее вращению, тормозят это вращение и удлиняют продолжительность суток. Однако доказательства этому в то время не было. Даже французский математик Лаплас, много занимавшийся приливами через полвека после Канта, не упоминает о приливном трении либо по неведению, либо считая такое действие приливов совершенно ничтожным, и основывается в своих исследованиях движения планет на абсолютной равномерности вращения Земли. Лишь в середине текущего столетия было действительно наблюдениями обнаружено предсказанное Кантом замедление вращения Земли. Вот как это произошло.

Уже давно люди интересовались движением Луны, которое очень неравномерно и сложно. Кроме вызывае-

мого эллиптичностью лунной орбиты периодического неравенства, наблюдениями было обнаружено несколько других неравенств, причина которых оставалась неизвестной, пока они не были объяснены притяжением Солнца и вековым изменением эксцентриситета земной орбиты и, частично, эллипсондальностью Земли.

Точное знание движения Луны было нужно для предсказания солнечных и лунных затмений, и, главное, для решения чрезвычайно важной практической задачи — определения географической долготы в путешествиях и особенно на море.

Развив математическую теорию движения Луны, немецкий астроном П. Ганзен составил изданные английским адмиралтейством в 1857 г. таблицы, очень хорошо представлявшие наблюдения Луны за целое столетие — с 1750 по 1850 гг. Естественно было ожидать, что они и дальше будут столь же хорошо давать возможность определять положения Луны. Однако уже через два десятилетия вычисленные по таблицам Ганзена положения Луны стали весьма заметно расходиться с наблюдениями, так что пришлось ввести эмпирические, т. е. не вытекающие из теории поправки к ним. Наконец, уже в начале текущего столетия американский математик Э. Браун составил новые, уточненные таблицы, вышедшие в 1919 г., в которых положения Луны даются рядами, содержащими свыше тысячи членов. По этим таблицам в больших международных астрономических ежегодниках даются эфемериды Луны, содержащие ее координаты на каждый час гринвичского времени в течение всего года. Такая эфемерида приведена в табл. 2.

Эта таблица устанавливает соответствие между моментами времени и положением Луны на небесной сфере, т. е. ее координатами, — прямым восхождением, которое подобно географической долготе на Земле, и склонением, подобным географической широте. Если наблюдение Луны в один из указанных в эфемериде моментов давало отклонение от приведенных в ней координат, то раньше приписывали это неточности самих координат. Но с равным правом можно заподозрить ошибочность момента, т. е. измерения времени по вращению Земли. Решить вопрос, в чем причина расхождения теории и наблюдений на основе такой эфемериды, не представляется возможным. Меньшие отклонения наблюденных положений от вычисленных были замечены у планеты Меркурий и еще меньшие — у Вене-

Таблица 2

Эфемерида Луны

1966, январь 1

Всемирное время	Прямое восхождение	Склонение
0^h	$9^h21^m32^s,81$	$+10°33'57,9''$
1	9 23 51 ,76	10 21 15,4
2	9 26 10 ,34	10 08 30,2
3	9 28 28 ,57	9 55 42,3
4	9 30 46 ,43	9 42 51,9
5	9 33 03 ,95	9 29 59,1
6	9 35 21 ,12	9 17 03,9

и т. д. на каждый час всего года.

Обозначения: h — час, m — минута времени, s — секунда времени, ° — градус, ′ — минута дуги, ″ — секунда дуги.

ры. Оказалось, что если одинаково изменить все моменты времени в их эфемеридах, то почти полностью устраняются наблюдаемые неувязки у всех трех светил. Отклонения у Меркурия от эфемериды были меньше, чем у Луны, потому что он движется медленней, и наблюденные неувязки были пропорциональны скоростям их видимых движений. Аналогичные отклонения наблюдались и у Венеры, движение которой еще медленней. На этом основании стало ясно, что в неточности эфемерид этих небесных тел виновато измерение времени, основанное на вращении Земли.

Вопрос получил окончательное решение после усовершенствования измерения времени с помощью новых высокоточных часов. Если хорошие маятниковые часы дают за сутки отклонение в несколько сотых долей секунды, т. е. позволяют определить время с относительной точностью до нескольких единиц 10^{-7}, то в середине текущего столетия появились кварцевые часы, в которых время измеряется числом вибраций кристалла горного хрусталя, дававшим точность в 100 раз бóльшую. Ныне время измеряется молекулярными и атомными часами с относительной точностью до 10^{-13} — в миллион раз точнее маятниковых часов.

Таким образом, с созданием кварцевых, а затем атомных часов был получен надежный эталон равно-

мерного времени, сравнение с которым позволило исследовать неправильности вращения Земли. Было введено понятие эфемеридного времени. Оно было выбрано так, чтобы 1 января 1900 г. эфемеридное время совпадало с гринвичским (всемирным) временем, а длина секунды установлена как определенная часть продолжительности 1900-го тропического года. Со временем, вследствие замедления вращения Земли, всемирное время стало отставать от эфемеридного времени, измеряемого атомными часами. Это отставание измеряется разностью ΔT-эфемеридное — всемирное время и к 1983 г. достигло почти 55 с.

Дальше мы скажем, как справляются с учетом такого отставания, но сначала опишем, как удалось проникнуть вглубь веков и определить замедление вращения Земли за последние два тысячелетия. До нас в летописях дошли сведения о том, где и когда наблюдались полные солнечные затмения и когда наблюдались лунные затмения. Вычисления показали, что эти явления происходили почти на три часа позже, если измерять время теперешней продолжительностью суток. Для устранения такого расхождения пришлось заключить, что раньше Земля вращалась быстрее. Отсюда было подсчитано, что продолжительность одних суток увеличивается примерно на 0,0015 с в 100 лет. Так ничтожно мало замедляется вращение Земли, но все же это замедление приводит к вполне ощутимым результатам.

Иногда высказывается недоумение, как увеличение суток на 0,0015 с в столетие могло накопиться в измерении времени до трех часов за 2000 лет. Поясним это кажущееся несоответствие следующим подсчетом. По истечении первого столетия от начальной эпохи 2000 лет назад сутки удлинились на 0,0015 с. Через 20 столетий это удлинение увеличилось в 20 раз и достигло 0,03 с. Среднее удлинение за это время было в 2 раза меньше и составило 0,015 с. Но 100 лет содержат 36 525 суток, а 2000 лет — 730 500 суток. Если в среднем каждые сутки удлинились на 0,015 с, то за 2000 лет накопится разница в 10 957,5 с, т. е. немногим больше трех часов. Отсюда следует, что относительная точность измерения времени по вращению Земли порядка 10^{-7}. Современные атомные часы хранят время с точностью до 10^{-13}, поэтому не удивительно, что такие часы позволяют контролировать вращение Земли и выявлять в нем небольшие отклонения от равномерности.

Астрономические наблюдения за последние десятилетия показали, что удлинение суток происходит неравномерно, причем наряду с общим, но не постоянным вековым нарастанием, имеют место флуктуации с годичным периодом. Оказалось, что ежегодно с июня до ноября вращение Земли немного ускоряется, а с ноября до июня следующего года немного замедляется. Относительная величина таких колебаний достигает 10^{-8}. По-видимому, эти колебания вызваны сезонными изменениями в циркуляции земной атмосферы. Действительно, по законам механики момент количества вращения изолированного тела должен оставаться постоянным и может лишь перераспределяться среди отдельных частей тела. Так и с Землей, атмосфера которой имеет массу около одной миллионной доли массы всей Земли, зато наиболее удаленную от оси вращения Земли и поэтому сильнее влияющую.

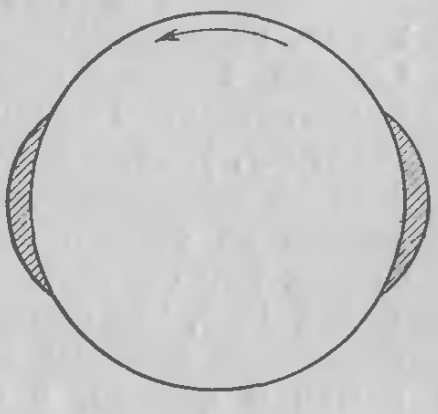


Рис. 17. Земля с двумя приливными выступами.

Кроме того, существуют случайные изменения скорости вращения Земли, которые мало изучены. Возможно, что они могут быть объяснены изменениями момента инерции Земли вследствие перекристаллизации некоторых пород в подкорковом слое Земли.

Теперь возникает вопрос, что же компенсирует общее, значительно большее вековое замедление вращения Земли? Обратимся к рис. 17, изображающему шар с двумя приливными выступами, напоминающий колесо с двумя тормозными колодками. В случае Земли эти колодки привязаны незримыми нитями тяготения к Луне и, в меньшей мере, к Солнцу. Известно, что при торможении эти колодки от трения нагреваются и стремятся сорваться, увлекая за собой механизм, который их удерживает прижатыми к колесу. То же самое происходит и с Землей, когда ее вращение задерживается приливными колодками, причем часть механической энергии вращения переходит в тепловую энергию, а часть передается Луне, которую Земля стремится увлечь своим вращением, совершающимся в 27 раз быстрее, чем обращение Луны вокруг Земли. В результате этого происходит некоторое удаление Луны от Земли.

Часть энергии вращения Земли передается Луне; система Земля + Луна сохраняет момент импульса, который лишь перераспределяется между этими телами (момент импульса Земли уменьшается, а Луны — увеличивается).

АТОМНОЕ ВРЕМЯ И РАДИОСИГНАЛЫ ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ

Мы уже сказали, что среднее солнечное время, согласованное с вращением Земли относительно Солнца с исключением неравномерностей, вызванных эллиптичностью земной орбиты и наклоном эклиптики к экватору, удовлетворяет всем практическим и большинству научно-технических потребностей. Это время, связанное со сменой дня и ночи, регулирует всю нашу жизнь. Его относительная точность, как мы видели, порядка 10^{-7}, что соответствует 3—4 с в год. Однако для некоторых научных задач, главным образом из астрономии и физики, в частности, связанных с изучением движения тел Солнечной системы и установлением частот радиоволн, такая точность становится недостаточной, что привело к введению эфемеридного времени и его измерению атомными часами с точностью до долей миллисекунды в год. По атомному времени, почти ежечасно в разных странах мира, передаются известные радиосигналы из шести импульсов, из которых начало последнего дает начало нового часа поясного времени.

Но здесь возникло затруднение из-за того, что рано или поздно такие сигналы начнут расходиться со средним солнечным или всемирным временем. Ведь шкала и нульпункт атомного времени были выбраны так, чтобы совпадать со всемирным временем 1 января 1900 г., а ныне, как мы уже сказали, расхождение достигло 55 с — величину весьма заметную. Тогда по международному соглашению решили во избежание накопления расхождения производить, в случае надобности, передвижку сигналов времени вперед или назад на одну секунду, чтобы они оставались согласованными со средним солнечным временем, по следующему правилу.

Если к середине или к концу календарного года разность между атомным и всемирным временем достигла или превзошла 0,7 с, то в полночь на 1 июля или на 1 января сигналы, даваемые по атомному времени, пе-

редаются на одну секунду раньше обычного, если всемирное время ушло вперед, что, между прочим, бывает очень редко, и на одну секунду позже, если оно отстало. Так как вращение Земли систематически замедляется, то обычно сигналы приходится на секунду задерживать. Так было, например, под новый 1980 год, который вследствие этого наступил на одну секунду позже, что, конечно, прошло незамеченным широкой публикой. Последняя задержка на 1 с производилась 1 июля 1983 г.

Такая передвижка на одну секунду в непрерывном счете времени не имеет практического значения. Даже в обычном мореходном деле ее можно не учитывать. В случае надобности, например, при точных определениях географических координат астрономическими наблюдениями или при полетах искусственных небесных тел, эту секунду легко учесть, так как о передвижке сигналов времени заранее объявляется в бюллетенях службы времени.

Представим себе точные часы, идущие по среднему солнечному времени и поставленные так, чтобы в полночь на 31 декабря данного года показывали согласно радиосигналам ровно 0 ч 0 мин 0 с. Прошли сутки, и они уже показывают 24 ч 0 мин 0 с старого года, что равно 1 января 0 ч 0 мин 0 с нового года. Однако радиосигналы возвестят начало нового года на одну секунду позже, в момент, когда ваши часы показали 0 ч 0 мин 1 с. В этой секунде виновато вращение Земли, которое своим замедленнем изменило счет секунд, и последняя минута уходящего года содержала 61 с.

Всемирное время определяется из астрономических наблюдений. В настоящий момент в этих наблюдениях участвуют около 70 оптических инструментов обсерваторий мира и инструменты нового поколения, в частности радиоинтерферометры и лунные лазеры. Сводную обработку этих наблюдений выполняет Международное бюро времени в Париже, которое публикует свои результаты вычнсления всемирного времени (точнее — разность между всемирным и атомным временем).

Результаты наблюдений около 30 инструментов служб времени СССР и социалистических стран поступают также в советский центр определения всемирного времени, находящийся под Москвой. Одним из распространенных инструментов для определения времени является пассажный инструмент с фотоэлектрической регистрацией звездных прохождений. На рис. 18 дана

фотография пассажного инструмента Пулковской службы времени. У инструмента — автор метода фотоэлектрической регистрации звездных прохождений, лауреат

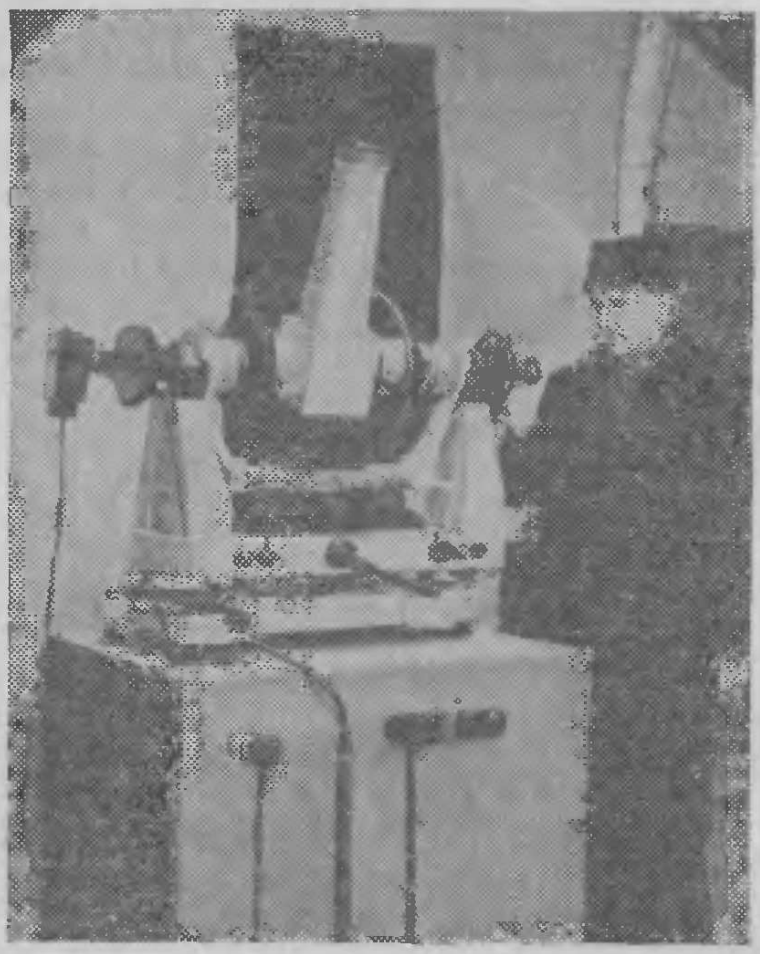


Рис. 18. Фотоэлектрический пассажный инструмент службы времени. У инструмента — автор фотоэлектрической регистрации звездных прохождений профессор Н. Н. Павлов.

Государственной премии, заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор Н. Н. Павлов.

ЗЕМНАЯ ОСЬ И ЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВНУТРИ ЗЕМЛИ

Земная ось есть воображаемая прямая линия, вокруг которой происходит вращение Земли. Ее направление определяется той точкой звездного неба, которая кажется нам неподвижной в течение короткого промежутка времени, скажем, одних суток, и называемой полюсом мира. Близко к этой точке находится

звезда второй величины, называемая Полярной, находящаяся в хвосте созвездия Малой Медведицы (рис. 19). Эта звезда в течение суток описывает на небесной сфере небольшую окружность радиусом около 50 минут дуги. Небесный экватор есть большой круг, отстоящий

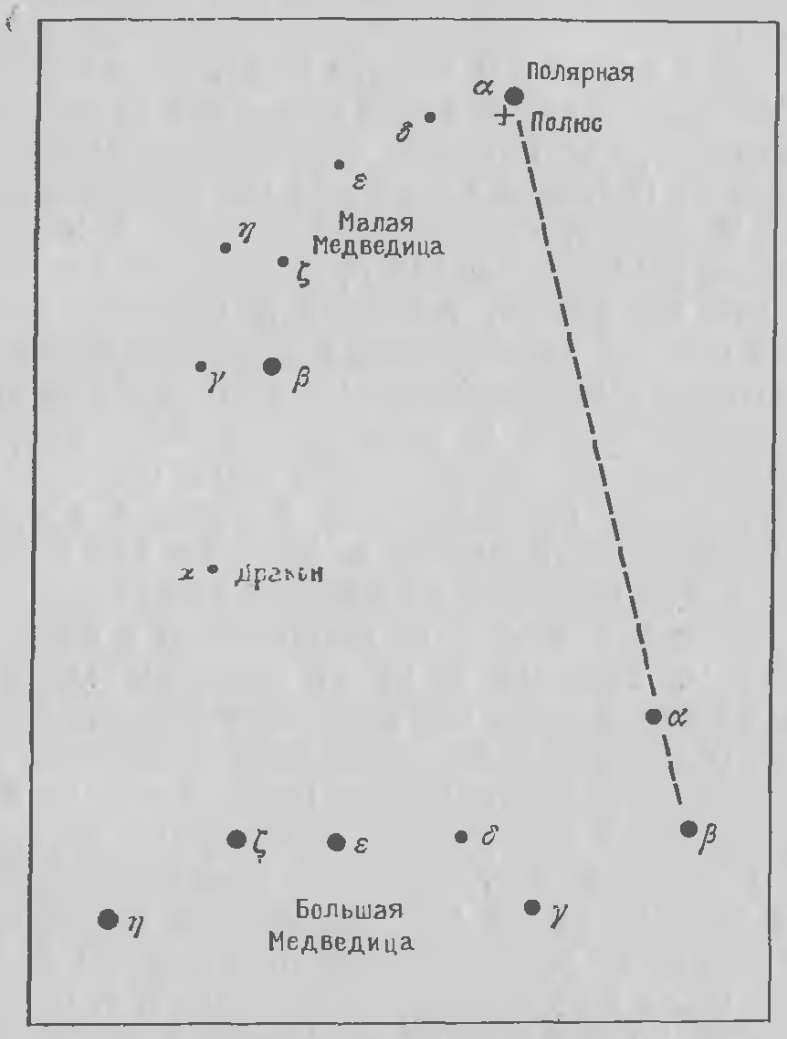


Рис. 19. Созвездия Большой и Малой Медведиц, Полярная звезда и Северный полюс мира.

от полюса мира на 90°. Он пересекается с эклиптикой, по которой совершается видимое годичное движение Солнца, в двух точках, называемых точками весеннего и осеннего равноденствия.

Очень давно, во II веке до н. э., греческий астроном Гиппарх обнаружил наблюдениями, что эти точки не остаются неподвижными на звездном небе, а медленно передвигаются навстречу движению Солнца. Он оценил скорость этого движения в 1° в столетие. Это явление получило название прецессии, т. е. ход впереди, или

по-русски предварение равноденствия, потому что равноденствие наступает раньше, чем Солнце совершило полный оборот по эклиптике. Уточненное значение этого движения, называемое постоянной прецессии, равно круглым счетом 50″ в год, и поэтому точки равноденствия совершают полный оборот по эклиптике примерно в 26 000 лет.

Вернемся к вопросу о полюсе мира. Определение его точного положения среди звезд есть одна из важнейших задач астрометрии, которая занимается измерениями дуг и углов на небесной сфере для определения координат звезд и планет, собственных движений и расстояний до звезд, решением задач практической астрономии, важных для географии, геодезии и навигации. Найти положение полюса мира можно с помощью фотографии. Представьте себе длиннофокусную фотографическую камеру, осуществленную в виде астрографа, направленную неподвижно на область неба близ полюса. Пусть фотографирование продолжается в течение всего темного времени ночи, а зимой в Арктике даже круглые сутки. На такой фотографии каждая звезда опишет более или менее длинную дугу окружности с единым общим центром, который и будет полюсом мира — той точкой, куда направлена ось вращения Земли.

Однако обычно положение полюса находится не фотографическими, а визуальными наблюдениями с помощью меридианных инструментов, которыми определяют момент и высоту кульминации какой-нибудь близполюсной звезды. Такое же наблюдение повторяют через 12 ч звездного времени. Если при первом наблюдении звезда была в верхней кульминации, т. е. проходила выше полюса, то при втором наблюдении она настолько же прошла ниже полюса, положение которого найдется как средняя точка между наблюденными положениями звезды. Конечно, приходится учитывать весьма малые изменения видимого положения звезды и состояния инструмента за протекшие полсутки.

Производя подобные наблюдения в течение долгого времени, можно заметить, что полюс мира медленно перемещается среди звезд. В угловой мере движение полюса составляет всего лишь 20″ в год. На такое постоянное смещение накладывается периодическое в виде эллипса с полуосями 9,21″ и 6,85″ и периодом в 18,6 лет, впервые обнаруженное английским астрономом Дж. Брадлеем в 1727 г. и названное нутацией. Общее

движение полюса мира совершается по малому кругу вокруг полюса эклиптики. Радиус этого круга, равный наклону экватора к эклиптике, составляет 23°27′ и очень медленно уменьшается, примерно на 0,5″ в год. Дошедшие до нас древние наблюдения действительно показывают, что в прошлом этот наклон был заметно

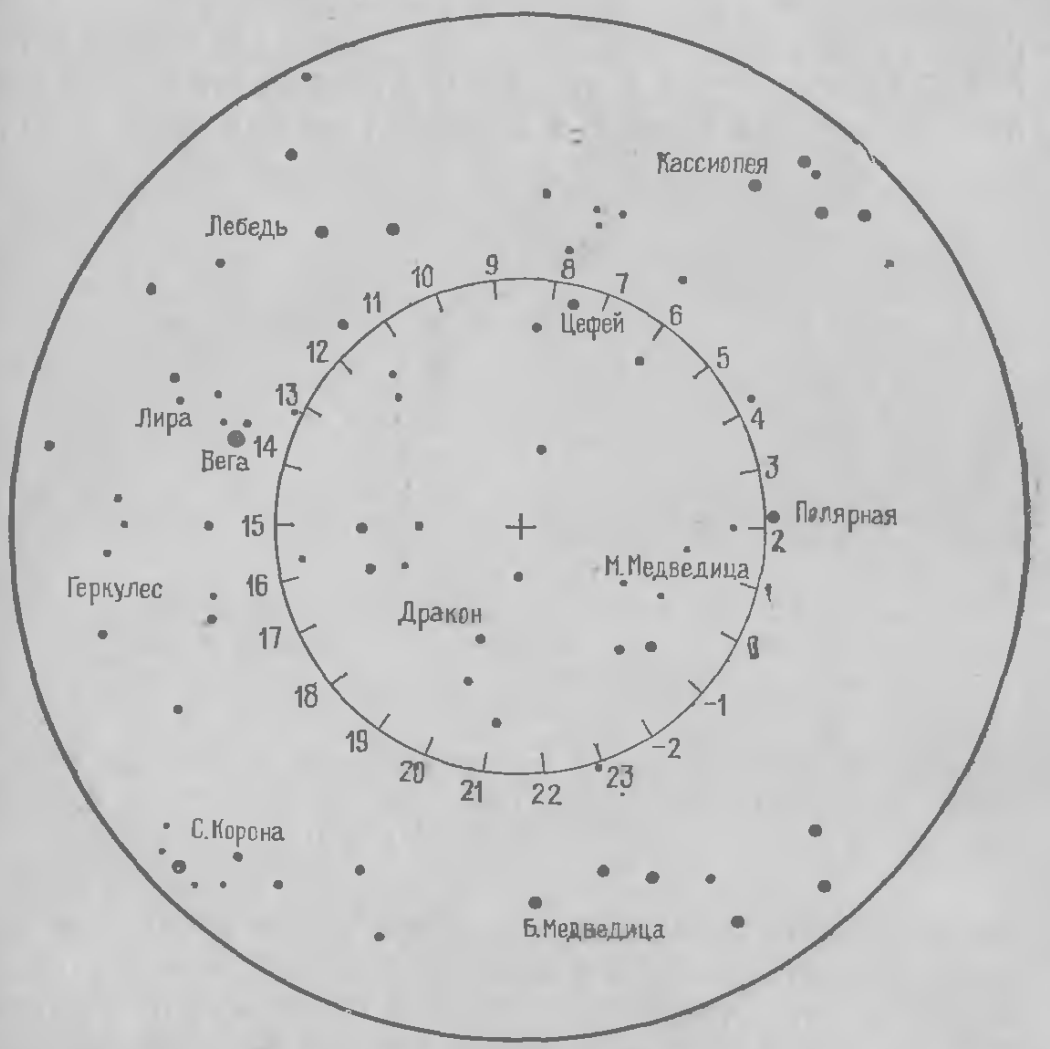


Рис. 20. Движение Северного полюса мира вокруг полюса эклиптики. Цифры показывают тысячелетия от начала нашей эры.

больше. Плоскость небесного экватора, будучи перпендикулярной к земной оси, тоже меняет свое положение, чем и вызывается движение точек пересечения экватора с эклиптикой, т. е. явление прецессии.

Итак, полюс мира движется вокруг полюса эклиптики с периодом около 26 000 лет, медленно переходя из одного созвездия в другое. Ныне он находится на расстоянии 50′ от Полярной звезды — альфа Малой Медведицы; к 2102 году полюс приблизится к ней до 28″, а затем станет удаляться от нее, двигаясь к созвездию

Цефея. Путь полюса изображен на рис. 20 с указанием его положения на каждую тысячу лет. Вблизи Южного полюса мира, находящегося в созвездии Октанта, нет ярких звезд, и лишь через 6000 лет он перейдет в область неба, богатую звездами второй и третьей величины.

Движение полюсов мира свидетельствует об изменении направления земной оси, которая описывает в пространстве конус с указанным периодом. Это движение происходит вместе с Землей так, как если бы она

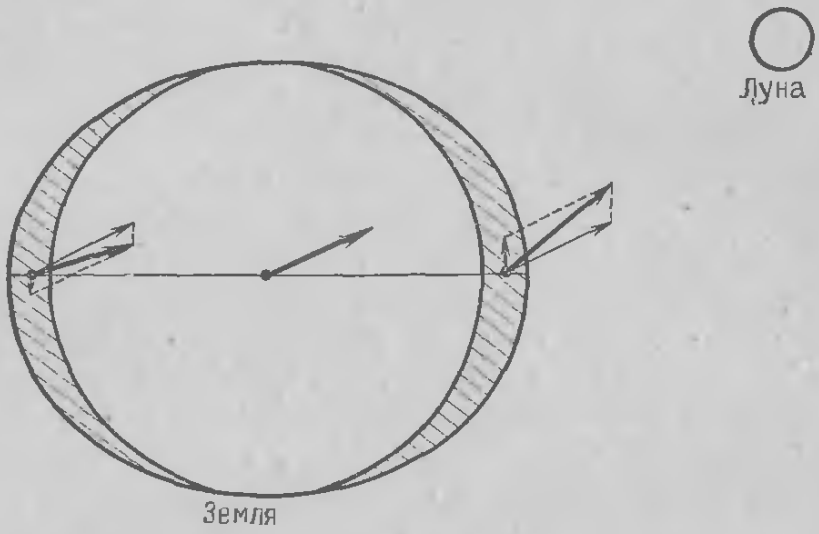


Рис. 21. Притяжение Луной экваториального вздутия Земли стремится повернуть Землю так, чтобы ее экваториальная плоскость проходила через Луну.

была прочно скреплена со своей осью вращения. Вызывается это движение теми же силами, что и морские приливы,— притяжением Луны и Солнца. Но в данном случае эти силы действуют не на водную оболочку Земли, а на массы, образующие экваториальное вздутие ее эллипсоидальной фигуры. Представим шар, вписанный в земной эллипсоид, которого он касается в полюсах. Такой шар притягивается Луной и Солнцем силами, приложенными к его центру и поэтому не вызывающими наклона или поворота. Но притяжение, действующее на экваториальное вздутие, стремится повернуть Землю так, чтобы плоскость земного экватора проходила через притягивающее тело, создавая этим опрокидывающий момент (рис. 21). Солнце в течение года дважды отходит от экватора до $\pm 23{,}5°$, а удаление Луны от экватора в течение месяца достигает даже $\pm 28{,}5°$.

Если бы Земля не вращалась, то она стремилась бы наклоняться, как бы кивая, так, чтобы экватор все время следил за Солнцем и Луной. Правда, вследствие огромной массы и инерции Земли, такие колебания были бы очень незначительными, так как на столь быструю смену направлений Земля не успевала бы реагировать. Но



Рис. 22. Прецессионное движение волчка.

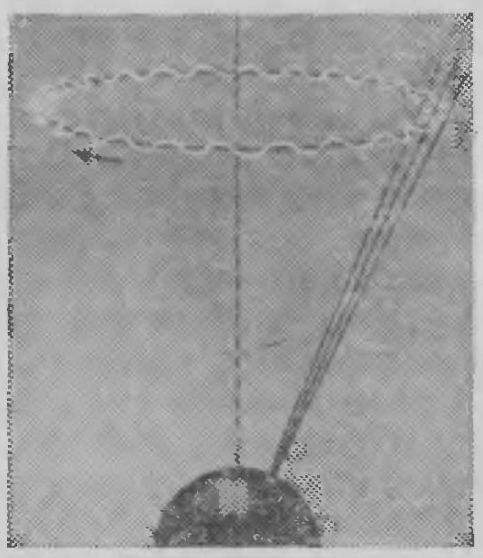


Рис. 23. Схема движения земной оси в пространстве. На прецессионное движение по большому конусу накладываются мелкие нутационные колебания, для ясности изображенные сильно преувеличенными.

быстрое вращение Земли создает гироскопический эффект, благодаря которому отклонение происходит в направлении, перпендикулярном к действующей силе. Мы хорошо знакомы с этим явлением на примере детского волчка. Сила тяжести стремится опрокинуть волчок, но вращение удерживает его от падения и в результате его ось описывает коническую поверхность, тем более узкую, чем быстрее вращение. Это же происходит и с Землей и проявляется в виде прецессии, а так как Луна меняет пределы своего склонения с периодом в 18,6 лет, то на прецессионное движение налагаются колебания в виде нутации с таким же периодом. Величину прецессии и нутации можно было бы вычислить теоретически, но для этого не хватает данных о распределении масс в экваториальном вздутии Земли, и поэтому ее приходится определять из наблюдений положений звезд в

разные эпохи. Именно так и были открыты эти явления задолго до того, как стало известно их происхождение.

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ШИРОТ

Описанное до сих пор движение и колебание земной оси во внешнем пространстве присуще и всей Земле в целом, как если бы она была крепко насажена на ось и прочно с ней скреплена. Однако еще в 1765 г. петербургский академик Леонард Эйлер, исследуя вращение твердого тела, теоретически вывел, что если это тело отличается от точного шара и его главные моменты инерции не равны между собой, то ось вращения будет определенным образом перемещаться внутри тела, описывая узкий конус вокруг оси наибольшего момента инерции с периодом, для Земли равным 305 суткам. Таково должно было быть движение земных полюсов по поверхности Земли, что вызвало бы колебания географических широт. Эйлер вычислил период этого движения, но так как его амплитуда зависит от распределения масс внутри Земли, она оставалась неизвестной. Ее можно было получить из наблюдений.

Вскоре начались поиски таких колебаний широты в крупнейших обсерваториях — в Пулкове, Гринвиче, в Вашингтоне, но безрезультатно, хотя были обнаружены небольшие несистематические отклонения. Лишь в 1884 г. Кюстнер в Берлине заподозрил в своих наблюдениях реальные изменения широты, что побудило постановку специальных наблюдений в нескольких европейских обсерваториях, не оставивших сомнений в наличии общих, хотя и очень малых изменений широт. Для окончательной проверки Международная геодезическая ассоциация решила произвести одновременные наблюдения широты в Европе и на Гавайских островах, расположенных почти на 180° по долготе от обсерваторий в Западной Европе, вследствие соображения, что если, например, Северный полюс приближался в сторону Европы, то широта европейских обсерваторий должна была увеличиваться, а широта Гавайских островов настолько же уменьшаться. Предположение подтвердилось, чем была доказана реальность движения полюсов по земной поверхности, но период 10 месяцев, предсказанный Эйлером, не был обнаружен. Тогда Чендлер в США произвел сравнение широт по старым наблюдени-

ям многих обсерваторий, начиная с Брадлея в Гринвиче в середине XVIII столетия, и обнаружил период, близкий к 14 месяцам. Вскоре Ньюком объяснил причину такого расхождения с Эйлером, который предполагал, что Земля абсолютно тверда и не имеет океанов с подвижной водой. Амплитуда этого колебания очень мала и не превосходит 0,2″, что соответствует 6 м на земной поверхности, иначе оно было бы открыто гораздо раньше.

Движение земных полюсов представляет большой интерес для астрономии, где его нужно учитывать при наиболее точных наблюдениях, а в особенности для геофизики, поскольку оно связано с внутренним строением Земли. Поэтому Международная геодезическая ассоциация решила организовать производство постоянных наблюдений за движением земных полюсов путем систематических определений широты — так называемой службы широты.

Большинство астрономических обсерваторий до открытия движения полюсов считало свою широту постоянной и не производило специальных повторных наблюдений, но из обычных меридианных наблюдений, производимых для определений координат звезд и составления звездных каталогов, можно получить и значения широты как побочный продукт, но широта, определенная таким образом, недостаточно точна для исследования столь мало заметного явления. Результаты определения широт разных обсерваторий трудно сравнивать между собой, так как в связи со своим географическим положением обсерватории наблюдают разные звезды, ошибки координат которых заметно влияют на результаты. Кроме того, различия в инструментах и методах наблюдений тоже затрудняют их сопоставление. Вследствие этого по международному соглашению было решено организовать ряд станций на одной общей широте, по возможности равномерно расположенных по долготе, оснащенных однотипными инструментами и с одинаковой программой наблюдений одних и тех же звезд. Таких станций было создано пять на северной широте 39°8′, а именно: Карлофорте на маленьком острове у берега Сардинии в Средиземном море, Чарджуй (ныне Чарджоу) в Туркестане на западном берегу Амударьи, Мицузава в Японии, Юкайя в Калифорнии близ Сан-Франциско и Гейтерсбург у восточного берега США близ Вашингтона. Эти станции начали регулярные

определения своих широт с 1899 г. Впоследствии разливы реки Амударьи заставили закрыть станцию в Чарджуе и организовать на той же широте новую станцию в Китабе (Узбекская ССР).

Как известно, широта места равна высоте полюса мира над горизонтом, но для ее определения приходится измерять высоту не полюса мира, который на небе ничем не отмечен, а какой-либо звезды с известным склонением или угловым расстоянием от полюса. На обычных обсерваториях для измерения высот звезд употребляются установленные по уровню инструменты с разделенными кругами, по которым отсчитываются градусы и их доли. Однако в данном случае требуется определение широты с точностью по крайней мере до 0,1″, которую такие инструменты не дают. Насколько высоки эти требования, показывает такой пример. Одна секунда дуги соответствует 1/206265 доли радиуса, и если его принять за 1 км = 1 000 000 мм, то секунда будет очень близка к 5 мм на поверхности такого шара. Поэтому 0,1″ соответствует половине толщины копеечной монетки, видимой с ребра на расстоянии в один километр. Такую точность разделенные круги меридианных инструментов не обеспечивают.

Существует способ определения широты без инструментов с разделенными кругами. Вообразим себе зрительную трубу, направленную в зенит данного места. Если имеется звезда, проходящая во время кульминации через зенит, то склонение такой звезды, т. е. ее угловое расстояние от экватора, равно широте данного места. Но вообще таких звезд не бывает. В лучшем случае может оказаться звезда, кульминирующая в нескольких минутах дуги от зенита, например, к северу от него. Наводим на звезду нить в окуляре, передвигаемую микрометрическим винтом, затем быстро поворачиваем инструмент вокруг вертикальной оси на 180° и, пока звезда еще не ушла из поля зрения трубы, вновь наводим на нее нить микрометра. Передвижение нити между этими наблюдениями, измеренное винтом микрометра, равно удвоенному зенитному расстоянию звезды во время ее кульминации.

Достаточно ярких звезд, столь близко кульминирующих к зениту, слишком мало для регулярных наблюдений, так что такой способ определения широты очень ограничен. Американский военный геодезист капитан А. Талькотт (1797—1883) расширил возможности на-

блюдений, сохранив основную идею способа, дающего возможность обходиться без отсчета делений на кругах. Его метод отличается от предыдущего тем, что вместо одной звезды, кульминирующей очень близко к зениту, наблюдаются две звезды, симметрично кульминирующих — одна к северу, а другая к югу от зенита, приблизительно на равных расстояниях от него. Если бы случайно оказалось, что обе звезды кульминируют на строго одинаковых зенитных расстояниях, то полусумма их склонений равнялась бы широте места. Но такая звездная пара была бы редчайшим исключением. На практике достаточно, если зенитные расстояния звезд в паре настолько близки между собой, что могут наблюдаться в трубу, не переставляя ее по высоте, а малая разность между ними измеряется окулярным микрометром. Возможное изменение наклона трубы контролируется двумя скрепленными с нею уровнями. Такие инструменты называются зенит-телескопами. Один из лучших зенит-телескопов принадлежит Пулковской обсерватории (рис. 24).

Точность описанного метода определения широты в значительной мере зависит от точности, с которой известны склонения наблюдаемых звезд. Эти склонения берутся из каталогов, в которых они приводятся на основании наблюдений меридианными инструментами на обсерваториях, т. е. по отсчетам разделенных кругов. Поэтому может показаться, что избежав такой малоточной процедуры при наблюдении широты, мы не устранили основной неточности, связанной с отсчетами кругов. Но дело в том, что при определении широты круг данного инструмента отсчитывается один раз, тогда как склонения в каталогах даются на основании многократных наблюдений на многих обсерваториях с разными инструментами и с учетом всех возможных ошибок. Поэтому способ Талькотта определения широты имеет большие преимущества и принят на всех международных широтных станциях и в большинстве других обсерваторий, которые занимаются определением своей широты в связи с исследованием движения земных полюсов. Тем не менее точность определения широт сильно зависит от принятых значений склонений наблюдаемых звезд, ввиду чего международные широтные станции и выбраны на одной общей параллели с тем, чтобы на них наблюдались одни и те же звезды. В этом случае ошибки склонений одинаково повлияют на широту всех

станций, и если станции равномерно распределены по всей окружности параллели, то никакого смещения полюса из-за ошибок склонений не произойдет.

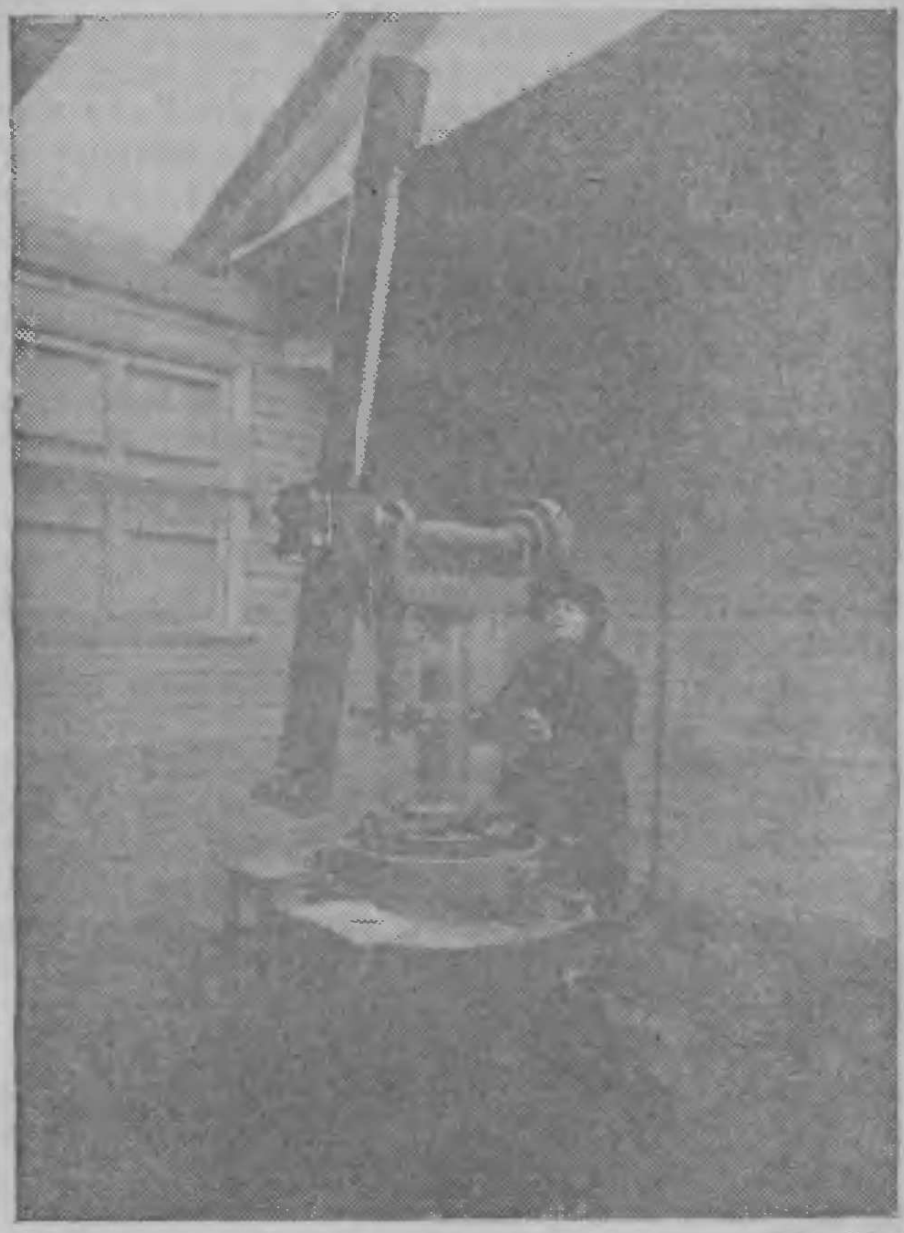


Рис. 24. Зенит-телескоп Пулковской обсерватории. Наблюдатель устанавливает трубу по зенитному расстоянию.

Для пояснения рассмотрим простейший случай. Пусть имеются две станции с разностью долгот в 180°, т. е. расположенных по разные стороны от полюса. Если широта одной из них увеличивается, то, значит, полюс к ней приближается, а от противоположной станции на столько же удаляется. Если изменения широты этих станций одинаковы по величине, но противоположны по

знаку, то это будет означать, что наблюденное движение полюса реально. В случае неравенства изменения широты нужно считать среднее из абсолютных изменений реальным, а отклонения от него — ошибками склонений и наблюдений.

Если движение полюса произойдет в направлении, перпендикулярном к меридиану данной станции, то там оно не почувствуется. Для его определения и получения засечки нужно иметь вторую пару широтных станций, отстоящих на $\pm 90°$ по долготе от первой пары. Но подобрать такие четыре станции, равно распределенные по долготе и на общей параллели, почти невозможно. Вместо этого и даже лучше иметь большее число станций, но тоже расположенных равномерно по долготе, что до некоторой степени и осуществлено упомянутыми пятью международными широтными станциями.

Регулярные наблюдения широты на международных станциях начались в 1899 г. С тех пор накоплен огромный наблюдательный материал. В настоящий момент в Международной службе широты — теперь она называется Международной службой движения полюсов — участвует около 60 оптических астрономических инструментов, таких как зенит-телескопы, астролябии и фотографические зенитные трубы, из которых около трети расположены в СССР и социалистических странах. В последние годы все больший вес при вычислении координат полюса приобретает новая техника наблюдений — радиоастрономическая и светолокационная.

Результаты наблюдений каждой станции, производящей определения своей широты, еженедельно передаются в международный центр службы широты, находящийся в настоящее время в Японии, а также в Бюро времени в Париже, которые ежегодно публикуют выведенное из общей сводки движение полюсов. Оно ясно распадается на три отдельные составляющие: движение с периодом в 14 месяцев или 420 суток переменной амплитуды, равное в среднем около 0,1″, открытое Чендлером, другое движение с годичным периодом и амплитудой около 0,08″, соответствующей 2,5 м на земной поверхности, и третье — очень медленное и неправильное вековое движение, в среднем около 0,003″ или 10 см в год. Рассмотрим их по порядку.

Чендлерово движение соответствует свободному движению полюсов: если Землю ударить косым, не проходящим через центр ударом, то Земля начнет колебаться

на оси с таким периодом, но по прекращении удара такие колебания начнут затухать и по одним оценкам через 15—20 лет, по другим за гораздо большее время уменьшатся наполовину. Очевидно, существуют какие-то факторы, поддерживающие или вновь возбуждающие

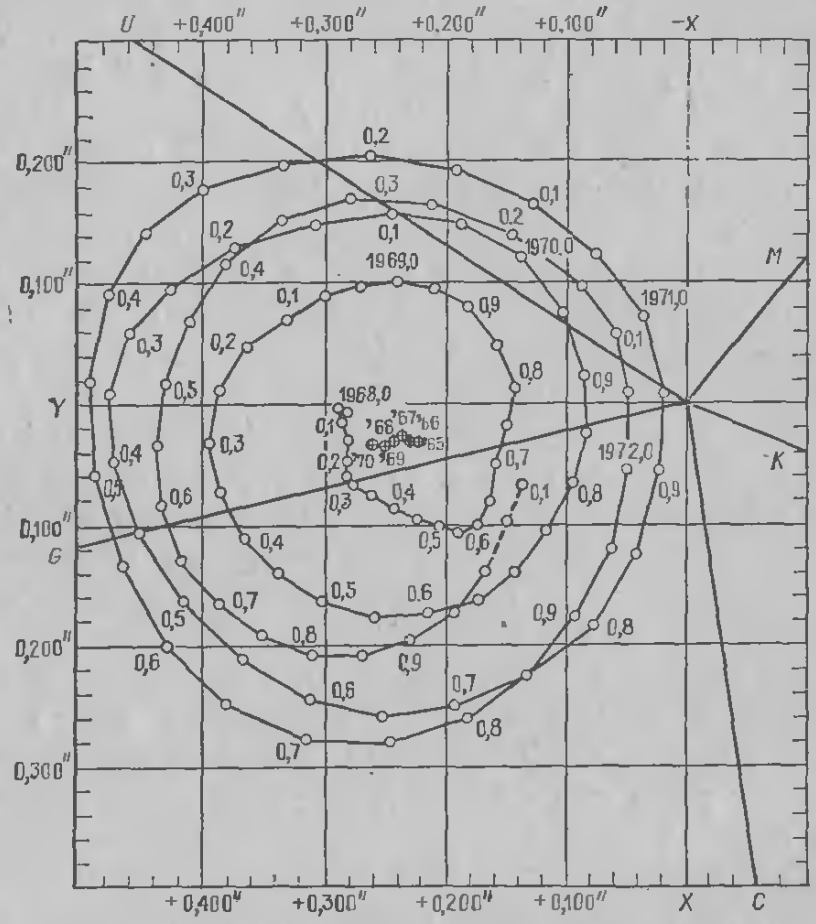


Рис. 25. Движение земного полюса в 1968—1973 гг. Положения полюса даны через каждые 0,05 года. Ось *X* направлена по Гринвичскому меридиану, ось *Y* — на 90° к западу от него. Косые линии проведены из начала координат, в котором был средний полюс в 1900 г., по направлениям на международные широтные станции: *C* — Карлофорте, *K* — Китаб, *M* — Мицузава, *U* — Юкайя, *G* — Гейтерсбург. Каждая клетка соответствует 0,1″ или 3,1 м.

эти колебания, предполагают, что это могут быть сильные землетрясения или вулканические извержения.

Что касается годичного колебания, то причина его ясна — оно вызывается метеорологическими явлениями — отложением снега на континентах и, главным образом, скоплением зимой воздушных масс над северо-восточной Азией, когда атмосферное давление становится на 15—20 мм рт. ст. выше обычного. Повышение давления на 10 мм рт. ст. создает нагрузку в 0,13 Н

на квадратный сантиметр или $13 \cdot 10^9$ Н на квадратный километр. Не удивительно, что такое огромное одностороннее давление, ежегодно распространяющееся на обширное пространство Восточной Сибири, Монголии и Северного Китая, чувствуется Землей в целом, вызывая ее колебания на оси вращения с годичным периодом.

Эти периодические движения, налагаясь одно на другое, дают неправильную, то скручивающуюся, то

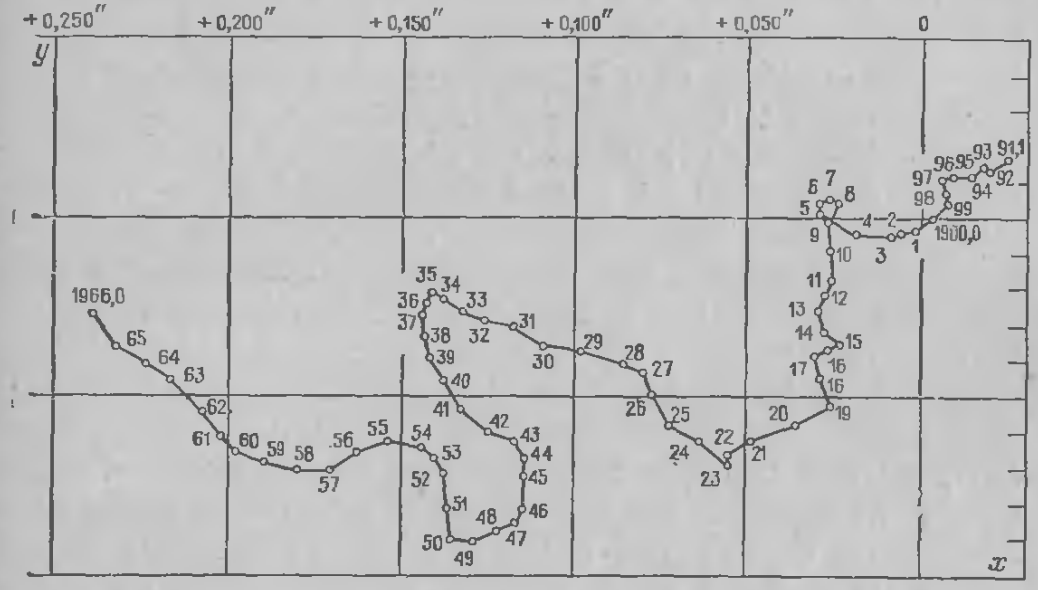


Рис. 26. Вековое движение среднего полюса Земли с 1891 по 1966 гг. Каждая клетка соответствует 0,05″ или 1,55 м.

раскручивающуюся спираль, приблизительно повторяющуюся через 6 лет — наименьшее кратное двух периодов — пяти чендлеровых и шести годовых. На рис. 25 изображена такая спираль за 1968—1973 гг. На нем ось X направлена по меридиану Гринвича, ось Y — к западу от него, а стрелками показаны направления на широтные станции: C — Карлофорте, K — Китаб, M — Мицузава, U — Юкайя и G — Гейтерсбург.

Наконец, третье, вековое движение полюса, существование которого оспаривается некоторыми специалистами, сместило за последние 80 лет среднее положение полюса приблизительно на 0,25″ или 8 м в направлении к Гренландии. Однако это движение было очень неправильным, как показано на рис. 26, и каким оно будет дальше — сказать нельзя. Во всяком случае такое наблюденное движение совершенно недостаточно для объяснения прошлых больших изменений климата, о которых свидетельствуют оледенения, охватывавшие

несколько десятков тысяч лет назад обширные пространства Европы, или находки тропических растений и животных в северных областях Евразии. Действительно, при скорости движения полюсов по 10 см в год они сдвинутся за 100 000 лет всего лишь на 10 км — величину чрезвычайно малую, которая не могла вызвать замеченных изменений климата.

Если допустить, что земные полюсы двигались с такой же скоростью и в самом далеком прошлом, то для перераспределения климатических поясов требовалось много миллионов лет, и мы ничего определенного не можем сказать о положении полюсов в столь отдаленное время. Сербский ученый геофизик М. Миланкович исследовал влияние на климат изменений элементов земной орбиты — эксцентриситета, положения перигелия, наклонения земной оси к эклиптике, и нашел, что такое влияние могло быть довольно значительным. Может быть, этих явлений в сочетании с движением земных полюсов и было достаточно для объяснения обнаруженных изменений климатических поясов в далеком прошлом, но вопрос еще остается открытым. Возможно, что более надежные сведения дает палеомагнетизм — исследование остаточной намагниченности древних горных пород на разных континентах, указывающее на миграцию магнитных полюсов Земли, связанных и с полюсами географическими. Однако рассказ об этих интересных вещах выходит за рамки нашей книги.

ДВИЖЕНИЕ ЗЕМЛИ И КАЛЕНДАРЬ

Основной единицей измерения коротких отрезков времени являются сутки, определяемые вращением Земли вокруг оси, но для больших интервалов требуется более длительная единица. Природа дала нам такую единицу — год, промежуток времени одного полного оборота Земли по орбите вокруг Солнца. И здесь возникает вопрос, по какой метке определять этот промежуток. Так же как в случае суточного вращения, эти метки могут быть разными. Наиболее стабильной будет метка в точке пересечения земной орбиты прямой, проведенной из центра Солнца к далекой и потому практически неподвижной звезде. Период обращения Земли относительно такой точки называется звездным или сидерическим годом, который имеет наиболее постоянную

продолжительность. Однако времена года, т. е. смена разных сезонов, зависит от движения Земли относительно точек весеннего и осеннего равноденствия, в которых небесный экватор пересекается с эклиптикой. Вследствие прецессии эти точки движутся навстречу движения Земли, и поэтому определяемая ими продолжительность года, называемого тропическим, меньше года звездного. Можно определить год по прохождению Земли через перигелий — ближайшую к Солнцу точку орбиты, такой год называется аномалистическим, его продолжительность больше, так как перигелий смещается в том же направлении, в котором движется Земля. Наконец, можно определять движение Земли относительно узлов лунной орбиты, которые имеют наиболее быстрое движение навстречу Земле, и поэтому такой год, называемый драконическим, с которым связаны солнечные и лунные затмения, наиболее короткий.

Приводим число средних солнечных суток в каждом из этих годов:

Год звездный	365,25636 суток = 365 сут 6 ч 9 мин 10 с;
Год тропический	365,24220 суток = 365 сут 5 ч 48 мин 46 с;
Год аномалистический	365,25964 суток = 365 сут 6 ч 13 мин 53 с;
Год драконический	346,62003 суток = 346 сут 14 ч 52 мин 51 с.

Для практической жизни счисление времени с помощью календаря должно быть основано на продолжительности тропического года, чтобы не разойтись с сезонами, т. е. чтобы зима, например, всегда приходилась на одни и те же месяцы. Но считать время строго тропическими годами неудобно, так как тогда их смена приходилась бы на разные часы дня. В Древнем Египте календарный год всегда имел 365 суток, что приводило к довольно быстрому сползанию относительно сезонов, четко выраженных разливами Нила. Во избежание этого римский император Юлий Цезарь в 46 г. произвел реформу календаря, установив среднюю продолжительность года в 365,25 суток, а во избежание дробного числа дней решил считать три года подряд по 365 суток, а каждый четвертый год — 366 суток. Эти добавочные сутки стали включаться в феврале, в римском календаре между шестым и седьмым днем, почему такой день стал называться дважды шестым, по-латински bis sextus, а год — bissextilis. Это слово в искаженном звучании превратилось в русское «високос», и год стал называться високосным.

Такой календарь, названный в честь Юлия Цезаря юлианским, или старым стилем, отличается простотой и вполне достаточен по точности. Его ошибка по сравнению с тропическим годом составляет одни сутки в 128 лет, что на практике не очень заметно, и если впоследствии была произведена реформа календаря, то совсем не из практических соображений, а по религиозной причине, связанной с христианским праздником пасхи. Дело в том, что Никейский собор — собрание высших чинов церкви в 325 г. в древнем Византийском городе Никее (ныне Изник) в Малой Азии установил правила для определения дня пасхи. Было решено праздновать пасху в первое воскресенье после весеннего полнолуния, которое наступает после равноденствия 21 марта. Так было в IV веке. Но затем вследствие неточности календарного года, который на 0,0078 суток или 11 мин 14 с продолжительней тропического года, наступление весеннего равноденствия стало происходить раньше 21 марта, и случалось, что нельзя было выполнить постановления Никейского собора, если, например, равноденствие наступало 15 марта, а воскресенье было 17-го, т. е. после равноденствия, но раньше 21 марта. В таком случае по первому определению нужно было в такое воскресенье праздновать пасху, а по второму правилу пасха должна быть лишь в следующее воскресенье.

Для решения такой дилеммы папа римский Григорий XIII повелел устранить накопившуюся к концу XII века разницу в десять дней и в 1582 г. после 4 октября сразу считать 15-е, а чтобы в будущем не накоплялась неточность календаря, решили три года в 400 лет вместо високосных считать простыми, что создавало среднюю продолжительность года в 365,2425 суток, всего на 0,0003 суток или 26 с длиннее тропического года природы.

Правило такого исключения високосных годов было дано простое, именно считать простыми годами те, у которых первые две цифры не делятся на четыре, а последние две являются нулями. После реформы календаря в 1582 г. такими годами были 1700, 1800 и 1900, когда каждый раз разница между старым календарем и новым, иногда называемым в честь папы, произведшим эту реформу, григорианским стилем, увеличивалась на один день и в нашем столетии достигла 13 дней. В 2000 г. эта разница не изменится, так как 20 делится на четыре, а увеличится до 14 дней лишь в 2100 г.

Новый стиль был сразу введен в католических странах, а затем и во всех странах Европы. В СССР он был принят в феврале 1918 г. Таким образом, наш календарь чисто солнечный и основан на периоде обращения Земли по орбите вокруг Солнца, но в нем сохранились некоторые отголоски лунного календаря, основанного на обращении Луны вокруг Земли. Это обращение тоже можно отсчитывать относительно разных «меток». Прежде всего метка может задаваться неизменным направлением, проведенным из центра Земли к далеким «неподвижным» звездам. Такой период называется звездным или сидерическим месяцем. Но важнее для жизни период обращения Луны относительно направления к Солнцу, который определяет смену лунных фаз и называется синодическим месяцем. Можно также отсчитывать обращение Луны относительно ее прохождений через перигелий, т. е. ближайшую к Земле точку лунной орбиты, что определяет аномалистический месяц. Далее, движение Луны относительно точек, в которых проекция ее орбиты на небесную сферу пересекается с эклиптикой, называемых лунными узлами, дает драконический месяц, с которым связаны солнечные и лунные затмения. Это странное название происходит от старинного китайского поверья, что в лунных узлах находится жилище дракона, который проглатывает Солнце и Луну, когда они приближаются к этим точкам. Наконец, движение Луны относительно точек равноденствия определяет тропический месяц.

Продолжительность этих периодов такова:

Месяц сидерический	27,32166 суток;
Месяц синодический	29,53059 суток;
Месяц аномалистический	27,55455 суток;
Месяц драконический	27,21222 суток;
Месяц тропический	27,32158 суток.

В нашем календаре продолжительность месяцев, за исключением февраля, больше синодического месяца и поэтому не связана с фазами Луны.

Названия месяцев происходят из старого Рима. Так, Январь, Март, Май и Июнь названы по именам римских божеств, Февраль по названию праздника в этом месяце, Апрель — от латинского слова, означающего раскрывание или развертывание. Июль назван в честь Юлия Цезаря, Август по имени императора Августа. По латинскому счету Сентябрь — седьмой, Октябрь — восьмой, Ноябрь — девятый и Декабрь — десятый,

порядковые номера при начале счета с Марта, когда прежде начинался новый год. Говорят, что в римском календаре раньше февраль содержал 29 дней в простом и 30 в високосном году, а август имел 30 дней. Но римский сенат решил, что Августу обидно, если названный его именем месяц имеет меньше дней, чем месяц, посвященный его предшественнику Юлию Цезарю; поэтому был взят один день от февраля и прибавлен к августу, чтобы уравнять его с июлем.

Как бы то ни было, но наш календарь чисто солнечный и никак не связан с фазами Луны, которые могут приходиться на любые числа месяцев. Однако в жарких странах сезоны выражены гораздо слабее и там важнее фазы Луны, так как из-за жары часть работ и движение караванов приходится совершать ночью. Поэтому многие из них имеют чисто лунный календарь, в котором чередуются месяцы в 29 и 30 дней, чтобы в среднем согласовать их с синодическим месяцем в 29,53 суток.

Начало каждого месяца бывает в новолуние, так что дата месяца прямо указывает на фазу Луны. Может быть, по этой причине и у нас в простонародье иногда Луну называют месяцем. Однако 12 таких лунных месяцев составляют всего 354,37 суток и такова средняя продолжительность лунного года. Для учета дробной части этого числа в магометанском календаре приняты простые годы в 354 суток и избыточные годы в 355 суток, которых бывает 11 в 30 лет. Такие короткие лунные годы не имеют никакой согласованности с солнечным годом, а следовательно и с сезонами.

Еврейский календарь тоже основан на лунном месяце, но для согласования с солнечным годом в него включается по довольно сложному правилу с периодом в 19 лет дополнительный, тринадцатый месяц в году.

Другие народы имели в древности очень разнообразные способы исчисления времени с помощью различных календарей, что сильно затрудняет хронологию и сопоставление разных дат и исторических событий. Разобраться в этом помогают дошедшие до нас сведения о некоторых астрономических явлениях, которые содержатся в летописях разных народов. Это главным образом описание солнечных и лунных затмений, особых конфигураций планет, появлений ярких комет и новых звезд. В связи с этим возникла необходимость непрерывного счета дней от некоторого произвольного, но очень удаленного начала, более раннего, чем все изве-

Таблица 3

Дни Юлианского периода

Номер дня 1 января всех лет XX столетия

Годы		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1900	241	5021	5386	5751	6116	6481	6847	7212	7577	7942	8308
1910	241	8673	9038	9403	9769	0134	0499	0864	1230	1595	1960
1920	242	2325	2691	3056	3421	3786	4152	4517	4882	5247	5613
1930	242	5978	6343	6708	7074	7439	7804	8169	8535	8900	9265
1940	242	9630	9996	0361	0726	1091	1457	1822	2187	2552	2918
1950	243	3283	3648	4013	4379	4744	5109	5474	5840	6205	6570
1960	243	6935	7301	7666	8031	8396	8762	9127	9492	9857	0223
1970	244	0588	0953	1318	1684	2049	2414	2779	3145	3510	3875
1980	244	4240	4606	4971	5336	5701	6067	6432	6797	7162	7528
1990	244	7893	8258	8623	8989	9354	9710	0084	0450	0815	1180

Примечание. Для подчеркнутых годов нужно первые три цифры брать из следующей строки, например, для 1 января 1945 г. имеем 2 431 457.

стные исторические даты. Такую систему счета предложил в XVII веке итальянский историк И. Скалигер, названную им Юлианской эрой. Заметим, что к Юлию Цезарю и его реформе календаря это название никакого отношения не имеет и Скалигер назвал так свою систему в честь своего отца, которого звали Юлием.

За начало счета дней Юлианской эры по некоторым несущественным соображениям было принято 1 января 4713 г. до н. э. старого стиля. Для нахождения номера дня всех лет нашего календаря имеются специальные таблицы, по которым, например, 1 января 1984 г. имеет номер 2 445 701. Такой непрерывный счет дней существенно помогает разбору и установлению дат исторических событий, да и ныне иногда приходится пользоваться счислением дней по Юлианскому периоду, например, в астрономии.

На с. 69 приведена таблица (табл. 3) дней Юлианского периода, дающая номер первого января всех лет XX столетия.

Чтобы получить номер Юлианского периода для любого дня года, нужно к номеру 1 января данного года прибавить число дней, протекших от этой даты до нужного дня. Для облегчения счета дней служит следующая табл. 4, в которой нужно различать простые и високосные годы.

Таблица 4

Месяц	Год		Месяц	Год	
	простой	високосный		простой	високосный
Январь	0	0	Июль	181	182
Февраль	31	31	Август	212	213
Март	59	60	Сентябрь	243	244
Апрель	90	91	Октябрь	273	274
Май	120	121	Ноябрь	304	305
Июнь	151	152	Декабрь	334	335

С помощью Юлианского периода легко найти день недели для любой заданной даты. Для этого нужно номер юлианского дня разделить на семь. Остаток укажет день недели (табл. 5).

Если искать день недели XX столетия, то для упрощения деления можно предварительно вычесть из номера юлианского дня 2 415 000 и затем делить только остаток.

Таблица 5

Остаток	День недели	Остаток	День недели
0	Понедельник	4	Пятница
1	Вторник	5	Суббота
2	Среда	6	Воскресенье
3	Четверг		

Для примера определим таким способом день недели Дня Победы 9 мая 1945 г. Таблица Юлианского периода дает для 1 января этого года номер 2 431 457, а так как это был простой год, то 1 мая еще на 120 дней больше. С 1 до 9 мая проходят еще 8 дней, так что искомый номер есть $2\,431\,457 + 128 = 2\,431\,585$, что при делении на 7 дней дает в остатке 2. Следовательно, это была среда.

ВОПРОС О РЕФОРМЕ КАЛЕНДАРЯ

Неоднократно, особенно в последнее время, ставился вопрос о реформе григорианского календаря. Что касается уточнения его для лучшего согласования с тропическим годом природы, то это не имеет ни малейшего смысла, так как его ошибка составляет один день в 3000 лет, что ни нам, ни нашим далеким потомкам абсолютно незаметно. Другое дело подразделения года. Конечно, существующая система месяцев неравной длины и вызванные этим неравенства кварталов неудобны. Число дней в каждом месяце приходится помнить, дни недели не согласованы с месяцами, существуют и другие неудобства.

Имеется много предложений для упрощения и упорядочения существующей системы, но введение их упирается в страх перед ломкой многовекового счета месяцев, кроме того, мало уверенности в том, что все народы и страны одновременно примут новую систему, а существование двух разных календарей произведет большую путаницу. Кроме того, даже если осложнение, вызванное введением новой системы, имеет переходящий характер, то навсегда останется неудобство сопоставления ее со старыми датами, выраженными по григорианскому календарю. Даже теперь, когда разница между

новым и старым стилем состоит лишь в определенном и стабильном числе дней, приходится некоторые даты приводить в двояком исчислении. Так, например, автор этих строк родился 14 апреля по старому стилю, а так как это было еще в прошлом столетии, когда разница составляла 12 дней, то теперь этот день имеет число 26 апреля. А родившийся, скажем, 25 декабря 1905 г. по старому стилю ныне должен считаться родившимся 7 января 1906 г. по новому стилю.

Во время французской революции была попытка введения реформированного календаря, в котором за начало года был принят день осеннего равноденствия 22 сентября 1792 г., год состоял из 12 месяцев по 30 дней, подразделенных на три декады, и пяти (в високосном году шести) добавочных дней, но продержался такой календарь недолго.

С очень глубокой древности у многих народов была в употреблении семидневная неделя, что без перерыва дошло до нашего времени. Семь дней были, вероятно, приняты по числу известных в то время подвижных светил: Солнца, Луны и пяти планет от Меркурия до Сатурна включительно. Отголоски этого сохранились в названиях дней недели в ряде языков (см. табл. 6).

Таблица 6

Дни недели на иностранных языках

Русский	Английский	Немецкий	Французский	Планета
Понедельник	Monday	Montag	Lundi	Луна
Вторник	Tuesday	Dienstag	Mardi	Марс
Среда	Wednesday	Mittwoch	Mercredi	Меркурий
Четверг	Thursday	Donnerstag	Jeudi	Юпитер
Пятница	Friday	Freitag	Vendredi	Венера
Суббота	Saturday	Sonnabend	Samedi	Сатурн
Воскресенье	Sunday	Sonntag	Dimanche	Солнце

День — day, tag, di = dies (*лат.*).

Примечание. Подчеркнуты части дней, содержащие наименования древнегерманских или римских богов, по которым названы планеты. Луна и Солнце, будучи подвижными светилами, прежде тоже относились к планетам.

Конечно, неудобно, что дни недели совсем не согласуются с числами месяцев, но ломать столь прочно и долго укоренившуюся систему не представляется разумным, тем более независимо от реформы календаря. Попытка введения пятидневной и шестидневной недели в СССР тоже продержалась недолго. Таким образом, вопрос о реформе календаря остается открытым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия задачи по изучению колебаний полюса и неравномерностей вращения Земли практически объединены в одну задачу по изучению вращения Земли. Действительно, изменения координат полюса влияют не только на изменения широт, но и на изменения долгот, а, следовательно, и на определение всемирного времени. Поэтому при вычислении координат полюса, наряду с результатами широтных наблюдений, используются также результаты наблюдений служб времени.

Некоторые из классических астрономических инструментов, такие как фотографические зенитные трубы, астролябии, позволяют определять одновременно две координаты — широту и всемирное время, а совокупность определений широты и времени в различных точках Земли, выбранных по определенному правилу, позволяет определить параметры вращения Земли: x и y — координаты полюса и всемирное время (разность между всемирным временем, определяемым неравномерно вращающейся Землей, и равномерным временем, задаваемым атомными часами).

В последние годы активно развиваются радиотехнические и светолокационные методы определения параметров вращения Земли — доплеровские измерения смещения частот, передаваемых с борта искусственных спутников Земли, радиоинтерферометрические, а также лазерная локация Луны и искусственных спутников Земли. Наибольшую точность дают длиннобазисные радиоинтерферометры, состоящие из двух или более антенн, удаленных на несколько тысяч километров. Именно увеличение расстояния между антеннами (базы интерферометра) и позволяет достигнуть высокой точности наблюдений — на два порядка выше точности классических астрономических инструментов. В отличие от короткобазисных радиоинтерферометров, у которых длина базы

не превышает десятков километров, антенны длиннобазисных радиоинтерферометров не соединены кабелем, и, следовательно, прием излучения объектов Вселенной производится не на один и тот же приемник, а на приемник каждой антенны. При этом требования к точности сличения и синхронизации атомных стандартов времени и частоты используемых на пунктах (антеннах), возрастают до нескольких наносекунд.

В течение 1980—1985 гг. в рамках Международного астрономического и Международного геодезического и географического союзов (МАС и МГГС) осуществляется международный проект МЕРИТ, призванный содействовать развитию новых методов изучения вращения Земли, а также выработке рекомендаций по созданию новой международной службы вращения Земли на основании сравнения этих методов друг с другом и с классическими астрономическими определениями времени и широты. Осуществление этого проекта подготовит новый этап в изучении одной из сложнейших проблем современной науки — вращения Земли, а именно переход от классических астрономических к новым радиотехническим и светолокационным методам наблюдений объектов Вселенной, которые смогут удовлетворять современным требованиям науки и практики, определять параметры вращения Земли и создать земную геоцентрическую систему координат с сантиметровой точностью. Такая точность позволит поставить на качественно новый уровень работы по космической геодезии и навигации, планетарной геофизике, прогнозу землетрясений, глобальной тектонике плит и т. д.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ДАННЫЕ О ЗЕМЛЕ

Экваториальный радиус $a = 6378{,}140$ км
Полярный радиус $b = 6356{,}755$ км
Средний радиус 6371,004 км
Радиус-вектор на уровне моря на широте φ

$$r = a(0{,}998\,324\,07 + 0{,}001\,676\,44\cos 2\varphi - 0{,}000\,003\,52\cos 4\varphi + \ldots,$$

Сплюснутость земного эллипсоида $\alpha = \dfrac{a-b}{a} = \dfrac{1}{298{,}257}$

Эксцентриситет земного меридиана $e = \sqrt{\dfrac{a^2-b^2}{a^2}} = 0{,}081\,820$

Поверхность Земли 509 494 365 км^2
Поверхность суши = 29, 2% всей поверхности Земли *)
Водная поверхность = 70,8% всей поверхности Земли
Объем Земли $1{,}083\,209 \cdot 10^{12}$ км$^3 \approx 1{,}1 \cdot 10^{27}$ см^3
Масса Земли $5{,}973 \cdot 10^{27}$ г **) = 1 : (332 946 ± 20) массы Солнца ≈ ≈ трем миллионным массы $\odot$
Средняя плотность Земли 5,574 г/см^3
Средняя плотность земной коры 2,80 г/см^3
Критическая скорость (скорость освобождения) у поверхности 11,2 км·с$^{-1}$
Длина 1° географической долготы $(111{,}321\cos\varphi - 0{,}094\cos 3\varphi)$ км
Длина 1° географической широты $(111{,}143 - 0{,}562\cos 2\varphi)$ км
Разность астрономической φ и геоцентрической φ' широт (в системе МАС)

$$\varphi - \varphi' = 692{,}74'' \sin 2\varphi - 1{,}163'' \sin 4\varphi + 0{,}003'' \sin 6\varphi$$

Угловая скорость вращения Земли $15{,}041''$ с$^{-1}$ = 0,000 072 921 с$^{-1}$
Линейная скорость точки экватора 465,119 м·с$^{-1}$
Линейная скорость точки земной поверхности на широте φ равна $465{,}119\cos\varphi$ м·с$^{-1}$
Средняя скорость движения Земли по орбите 29,765 км·с$^{-1}$ ≈ ≈ 100 000 км·ч$^{-1}$
Наибольшая скорость (в перигелии) 30,287 км·с$^{-1}$
Наименьшая скорость (в афелии) 29,291 км·с$^{-1}$
Ускорение Земли к Солнцу 0,59 см·с$^{-2}$
Ускорение силы тяжести на Земле (стандартное) $g_0 = 980{,}665$ см·с$^{-2}$

---

*) Около 0,1 суши покрыто вечными снегами и льдом.
**) Около 0,024% массы Земли составляет вода во всех ее формах; масса атмосферы Земли $(5{,}158 \pm 0{,}001 \cdot 10^{21}$ г (АЦ № 593, 1970).

То же на широте 15° (абсолютное) $g_{45°} = 980{,}616$ см·с$^{-2}$

Ночное излучение Земли (в ясную ночь) 70—140 Дж·м$^{-2}$·с$^{-1}$

ДАННЫЕ О ЛУНЕ

Средний суточный параллакс Луны 57′2,60″ = ∼1° (параллакс меняется в среднем от 53′54,6″ до 61′31,4″)

Среднее расстояние Луны от Земли 384 401 ± 1 км = 0,002 57 а. е. = = 60,2682 радиуса Земли (расстояние меняется от 356 400 до 406 700 км)

Наибольший видимый угловой диаметр Луны 33′32″

Наименьший видимый угловой диаметр Луны 29′20″

Видимый угловой диаметр Луны на среднем расстоянии от Земли 31′5,16″ = ≈1865,2″

Диаметр Луны 3476 км = 0,2725 экв. диаметра Земли ≈ 3/11 земного

Объем Луны $2199{,}1 \cdot 10^7$ км^3 = $2{,}2 \cdot 10^{25}$ см^3 = 0,020 266 объема Земли ≈1/50 земного

Поверхность Луны $3{,}791 \cdot 10^7$ км^2 = 0,0743 земной 1/14 земной

Масса Луны 1/81,301 массы Земли = 0,123 00 массы Земли = = 1/27 070 500 массы Солнца = $7{,}35 \cdot 10^{25}$ г ∼73 триллиона тонн

Средняя плотность Луны 3,341 г·см$^{-3}$ = 0,607 средней плотности Земли

Ускорение силы тяжести на поверхности Луны 1,622 м·с$^{-2}$ = = 0,165 земного ≈1/6 земного

Критическая скорость (скорость освобождения) 2,38 км·с$^{-1}$

Средний эксцентриситет лунной орбиты 0,054 90 = 1/18; линейный эксцентриситет 21 000 км

Наклон лунной орбиты к эклиптике 5°8′43,4″ (меняется с $P = 173^d$ от 4°59′ до 5°19′)

Средний наклон лунного экватора к орбите 6°40,7′ (наклон меняется от 6°51′ до 6°31′)

Наклон лунного экватора к эклиптике 1°32′47″ ± 24″

Наклон лунной орбиты к земному экватору меняется от 18°18′ до 28°36′

Либрация по долготе ±7°54′

Либрация по широте ±6°50′

Параллактическая либрация около 1°

Невидимая с Земли часть поверхности Луны составляет 0,410 всей поверхности Луны (в первый раз сфотографирована первой советской автоматической межпланетной станцией в октябре 1959 г.); 0,180 всей поверхности то видимы, то невидимы

Средняя видимая угловая скорость движения Луны 12°,15 в сутки, около 0°53 в час ≈ поперечник лунного диска в час

Средняя скорость движения Луны по орбите 1,023 км·с$^{-1}$ ≈ ≈ 3681 км·ч$^{-1}$

Ускорение Луны в ее движении вокруг Земли 0,272 см·с$^{-2}$

Сидерический месяц, равный периоду вращения Луны, $27^d7^h43^m11^s{,}47$ = = $27^d{,}321\,661$ ср. суток ≈ 655^h43^m

Синодический месяц $29^d12^h44^m2^s{,}78 = 29^d{,}530\,588\,2$ ср. суток ≈ 708^h31^m (меняется от $29^d{,}25$ до $29^d{,}83$, т. е. ∼ на 13^h, вследствие эллиптичности лунной орбиты)

Период вращения линии узлов 6798^d ≈ 18,61 тропич. лет

Период вращения линии апсид 3232^d ≈ 8,85 тропич. лет

Сферическое альбедо Луны 0,05—0,18

Видимая визуальная звездная величина в полнолунии $m_V = -12^m,71 \pm 0^m,06$ (полная Луна светит в 465 000 ($\pm 10\%$) раз слабее Солнца)

Показатель цвета Луны $B - V = +1^m,2$

Средняя яркость полной Луны 0,251 сб

Освещенность, создаваемая полной Луной в зените на Земле на поверхности, перпендикулярной к направлению падающих лучей 0,25 люкса

«Лунная постоянная» — поток от Луны на Землю — 1/54 000 Дж

Температура в подсолнечной точке +130 °С

Температура ночной стороны поверхности Луны — 150 ÷ 160 °С

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ	3
ФОРМА ЗЕМЛИ И ЕЕ РАЗМЕРЫ	5
УСКОРЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, МАССА И СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ ЗЕМЛИ	15
ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ И ЕГО ДОКАЗАТЕЛЬСТВА	20
ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ И ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ	27
НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ И МОРСКИЕ ПРИЛИВЫ	35
АТОМНОЕ ВРЕМЯ И РАДИОСИГНАЛЫ ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ	48
ЗЕМНАЯ ОСЬ И ЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ В ПРОСТРАНСТВЕ И ВНУТРИ ЗЕМЛИ	50
ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ШИРОТ	56
ДВИЖЕНИЕ ЗЕМЛИ И КАЛЕНДАРЬ	64
ВОПРОС О РЕФОРМЕ КАЛЕНДАРЯ	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74
ПРИЛОЖЕНИЕ	76

Александр Александрович Михайлов

ЗЕМЛЯ И ЕЕ ВРАЩЕНИЕ

(Серия: Библиотечка «Квант»)

Редактор *В. А. Наумов*
Технический редактор *Е. В. Морозова*
Корректор *Е. В. Сидоркина*

ИБ № 12274

Сдано в набор 06.12.83. Подписано к печати 29.02.84. Т-07266. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага книжно-журнальная. Литературная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 4,2. Усл. кр.-отт. 4,62. Уч.-изд. л. 3,98 Тираж 150 000 экз. Заказ № 897. Цена 15 коп.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.

15 коп.