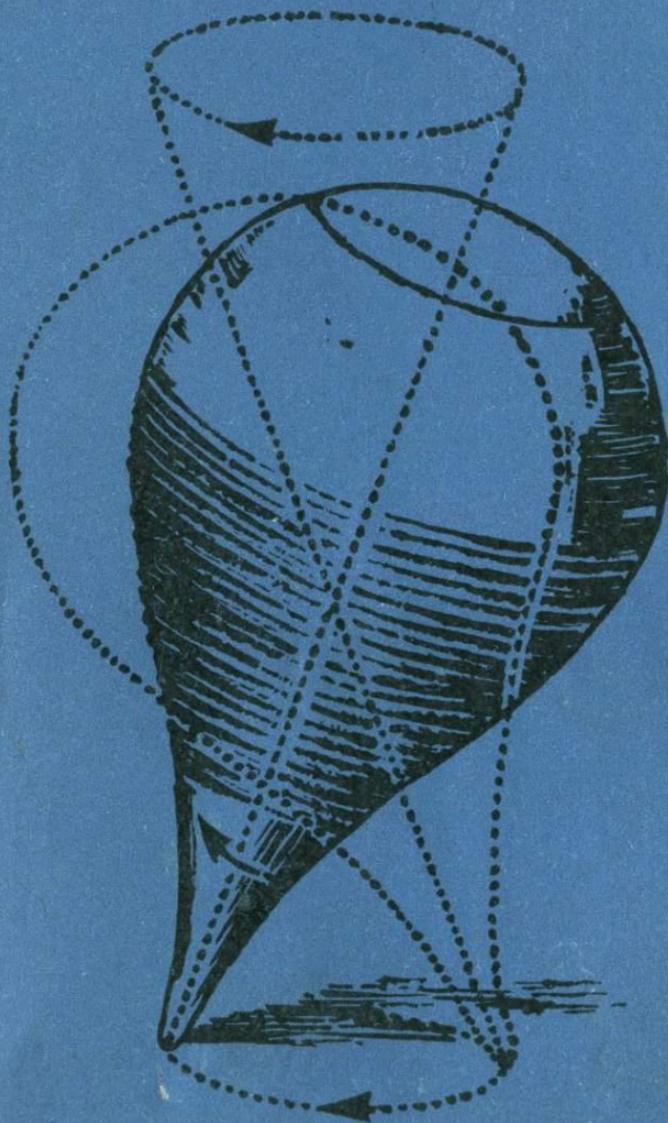


К. А. Куликов
**Вращение
Земли**



К. А. Куликов

Вращение Земли

4457



МОСКВА
«НЕДРА»
1985



ББК 526 : 551.42

К 90

УДК 550.31(023)

Куликов К. А.

Рецензент: *Н. Б. Сажина*, д-р техн. наук (Всесоюзный научно-исследовательский институт зарубежной геологии)

Куликов К. А.

К 90 Вращение Земли. — М.: Недра, 1985.—159 с.

30 к.

В популярной форме рассказано о вращении Земли — одном из основных свойств планеты, определяющих ее строение и многие процессы, происходящие на поверхности Земли и в атмосфере (смена времен года и времени суток, циркуляция атмосферы, воды, рождение ураганов, ветров, размыв берегов, движение полюсов, изменение силы тяжести и др.). Приведены существующие модели строения Земли (Буллена, Джеффриса и Висенте, Молоденского).

Для читателей, интересующихся географией, геологией, геофизикой, астрономией, метеорологией.

Ил. 56.

К $\frac{1903010000-061}{043(01)-85}$ 15-85

ББК 526 : 551.42

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вращение Земли — одно из важнейших свойств нашей планеты. Оно обуславливает не только смену дня и ночи, видимое суточное движение небесных тел, но и многие процессы, происходящие на Земле.

Представление о вращении Земли возникло еще в древности. Изучением закономерностей ее движения занимались И. Кеплер и И. Ньютон, П. Лаплас и Ж. Лагранж, Л. Эйлер и А. М. Ляпунов. В настоящее время в мире действует широко разветвленная сеть обсерваторий, в том числе крупнейшая в нашей стране — Пулковская, в которых ведутся непрерывные наблюдения за вращением Земли, изменением широт, движением полюсов. Велико значение получаемых в результате наблюдений параметров вращения Земли для решения многих проблем астрономии, геофизики, геодезии и картографии.

Земля является одной из планет Солнечной системы, центральное тело которой — Солнце. Невозможно переоценить значение солнечной энергии для всех жизненно важных процессов, происходящих на Земле. Книга кратко знакомит читателя с Солнцем, процессами, происходящими на его поверхности, с законами его вращения.

Большое влияние на Землю оказывает Луна, которая, действуя вместе с Солнцем на экваториальное утолщение Земли, ориентирует ее ось вращения в пространстве, вызывая прецессию, нутацию и различного рода приливы в гидросфере и в самой Земле.

На Землю, безусловно, влияют и планеты, в особенности большие, вызывая периодические возмущения ее движения, например прецессию. За последние годы с помощью автоматических межпланетных станций получены совершенно новые сведения о поверхности этих планет, их атмосфере.

В книге дается краткий исторический обзор изучения Земли, рассматриваются различные физические процессы, происходящие как на ее поверхности, так и в атмосфере, приведены существующие моде-

ли строения Земли. Читатель узнает о вращении Земли относительно звезд, Солнца, Луны, о вращении больших планет Солнечной системы и о многом другом.

Для читателя, не знакомого с некоторыми определениями, понятиями и терминами, в конце книги помещено приложение, которое поможет активнее воспринимать материал.

НАШЕ ДНЕВНОЕ СВЕТИЛО

ВОСХОД СОЛНЦА

Раннее утро. Розовеет восточная часть неба, возвещая восход Солнца. Все светлее и светлее становится красноватый небосвод над местом восхода. Вот уже показался верхний край нашего дневного светила, разбросавшего снопы ярких лучей над всей восточной частью горизонта (рис. 1). Постепенно «выползло», поднялось все Солнце, яркое, слегка красноватое и вследствие рефракции чуть сплюснутое. По мере дальнейшего его подъема над горизонтом красноватость и сплюснутость исчезают и Солнце становится ослепительно блестящим почти круглым диском. Поднимаясь все выше и выше над горизонтом, оно проходит в полдень через меридиан, занимая на небе самое высокое положение, затем начинает клониться к западу. Около горизонта оно опять краснеет, слегка деформируется — сжимается по высоте, оставаясь вытянутым вдоль горизонта, и заходит (рис. 2). Описанная картина наблюдается в средних широтах. Время нахождения Солнца над горизонтом, т. е. от восхода до за-

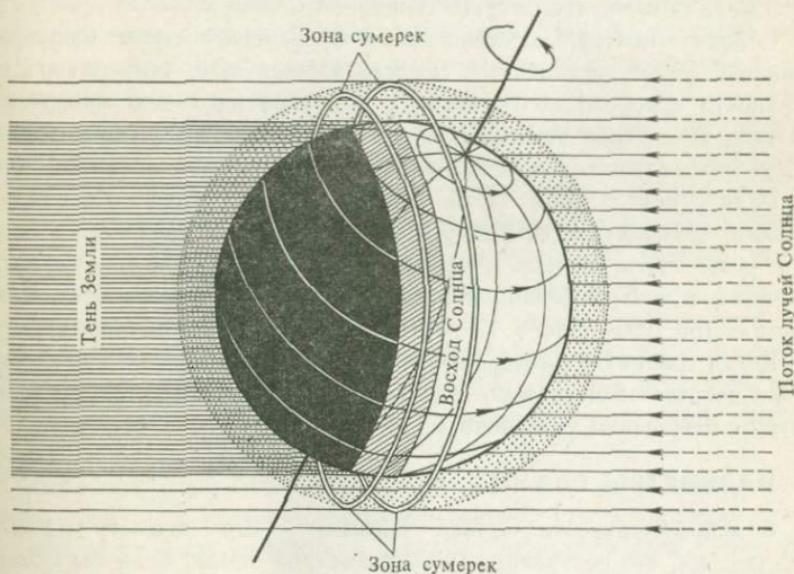


Рис. 1. Восход Солнца

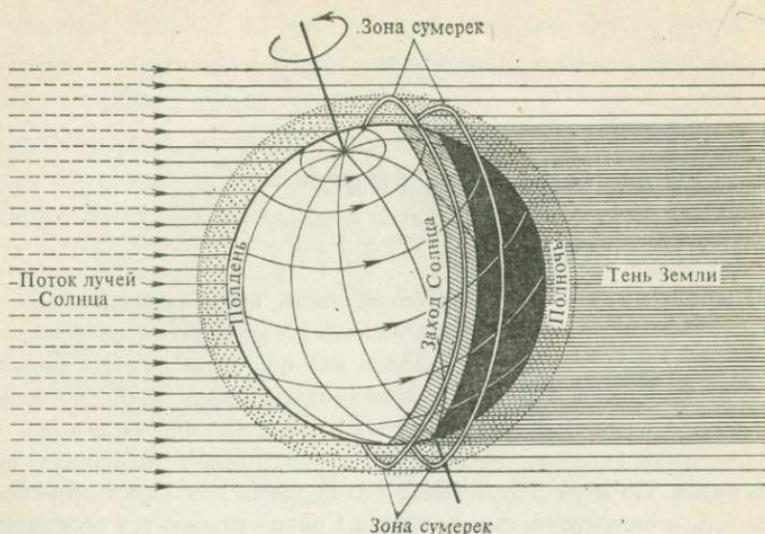


Рис. 2. Заход Солнца

хода, колеблется от нуля до полугода в зависимости от времени года и широты места на Земле.

Солнце, видимое на небе как небольшой яркий диск, является источником света, тепла и почти всех других видов энергии, которые использует человечество. Все разнообразие животного и растительного мира обязано своим существованием Солнцу.

Солнце — центральное тело нашей Солнечной системы. Оно представляет собой раскаленный самосветящийся шар, температура поверхности которого почти 6000°C , а внутри него — во много раз больше. При такой температуре все вещества, образующие Солнце, могут находиться только в газообразном состоянии.

Радиус центральной части Солнца (ядра) около 0,2 радиуса Солнца, температура ее более 15 млн. $^{\circ}\text{C}$. В ядре содержится половина всей массы Солнца и оно дает 99 % его излучения. Согласно расчетам в центре Солнца давление достигает 300 млн. МПа, плотность — 150 г/см^3 (что в 13 раз превышает плотность свинца).

Когда говорят о размерах Солнца, имеют в виду размеры между резко очерченными краями, видимыми невооруженным глазом или в трубу с небольшим увеличением.

ПАРАМЕТРЫ СОЛНЦА

В действительности Солнце громадно. Его диаметр — 1 млн. 390 тыс. км, что составляет 109,1 диаметров Земли. Если бы Солнце было покое, то в него можно было бы поместить 1 млн. 300 тыс. земных шаров. Масса Солнца составляет $1,989 \cdot 10^{30}$ кг, т. е. в 333 434

раза больше массы Земли, вследствие чего сила тяжести на Солнце в 28 раз больше, чем на поверхности Земли. Так как отношение объемов Солнца и Земли значительно больше отношения их масс, средняя плотность Солнца составляет лишь 0,256 плотности Земли и равна 1,41 г/см³.

Видимый угловой радиус Солнца несколько изменяется в течение года вследствие небольшого изменения расстояния Земли от Солнца, вызванного эллиптичностью земной орбиты. На среднем расстоянии (149 597 870 млн. км) он составляет 962", что соответствует линейному радиусу 696 000 км.

Имеющиеся в распоряжении современной науки данные показывают, что Солнце уже много миллионов лет находится в таком же физическом состоянии, какое наблюдается в настоящее время.

ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА

От Солнца ежеминутно на один квадратный сантиметр поверхности, перпендикулярной к лучам Солнца и находящейся за пределами земной атмосферы, поступает почти 8 Дж энергии. Подсчитав площадь поверхности одного освещенного Солнцем полушария Земли, мы получим огромное количество энергии — $214 \cdot 10^{17}$ Дж/мин.

Источником энергии, которая излучается Солнцем, является его центральная часть, по происходящим в ней процессам аналогичная термоядерному реактору. В недрах Солнца при высоких температурах и давлениях происходят преобразования ядер одних элементов в другие — термоядерные реакции, протекающие с выделением огромного количества энергии. Совокупность термоядерных реакций, приводящих к образованию гелия из водорода, — по современным представлениям основной источник энергии Солнца и звезд. Освободившаяся в недрах Солнца энергия в виде излучения медленно просачивается наружу сквозь толщу непрозрачного газа, не вызывая там никаких изменений. Однако ближе к поверхности тепловая энергия частично превращается в механическую, появляются поднимающиеся и опускающиеся потоки газов — происходит газовый процесс, называемый конвекцией. Движения газа сопровождаются сжатиями и разрежениями, которые образуют волны, распространяющиеся со скоростью звука и выходящие в верхние слои солнечной атмосферы; здесь они образуют фотосферу. В атмосфере Солнца регулярно возникают характерные образования, называемые *солнечной активностью*.

Фотосфера Солнца по яркости не везде одинакова: в середине она ярче — светлее, к краям — несколько темнее. Это происходит потому, что в середине солнечного диска наблюдаются более глубокие и, следовательно, более горячие, чем на краях, слои раскаленного газа. В фотосфере часто появляются темные образования, называемые

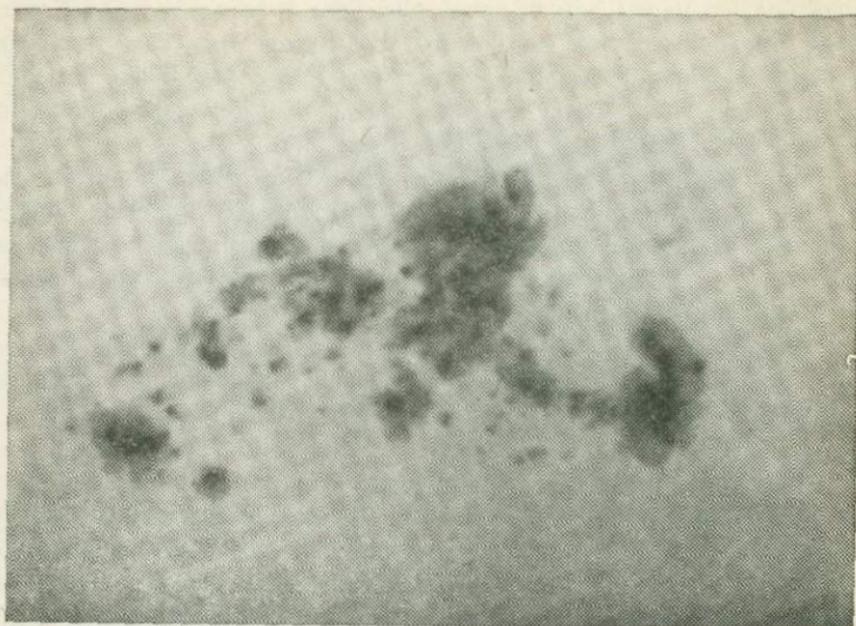


Рис. 3. Группа солнечных пятен

мые *солнечными пятнами*. Размеры их самые различные. Пятно возникает в виде небольшого образования (так называемой поры) и, постепенно развиваясь, иногда достигает огромных размеров (до 40 000 км). Время существования каждого пятна от одного дня до многих месяцев. Развитое пятно имеет в середине темную часть (так называемое ядро), раз в 10—20 слабее по яркости, чем фотосфера (рис. 3).

Если наблюдать Солнце ежедневно, то можно заметить, что пятна перемещаются по диску Солнца с восточного (для земного наблюдателя) его края к западному. Выйдя из-за восточного края, пятно через 13—14 дней скрывается за западным краем, а еще через 13—14 дней вновь может появиться из-за восточного края, если не исчезнет совсем за это время. Часто солнечные пятна возникают группами. Количество пятен и групп, появляющихся на Солнце, подчинено некоторой закономерности. В среднем через каждые 11 лет наступает максимум пятнообразовательной деятельности Солнца, затем количество пятен уменьшается, и в годы минимума их бывает очень мало. Иногда 10—12 дней пятен не бывает вовсе.

Солнечные пятна обладают сильным магнитным полем. Если группа пятен содержит два главных пятна, то поле их противоположно по знаку. В течение цикла все восточные главные пятна в Северном полушарии имеют одну полярность, а в Южном — другую.

В следующем цикле полярности меняются на обратные. Поэтому настоящим циклом нужно считать не 11-летний, а 22-летний период.

ВРАЩЕНИЕ СОЛНЦА

Исследованиями в течение многих лет установлено, что пятна движутся с различной скоростью. Когда пятно выходит из-за края Солнца, скорость его возрастает от нуля до максимальной величины в центре Солнца (точнее — на центральном меридиане); по мере продвижения пятна от центра Солнца скорость его убывает от максимума до нуля, т. е. Солнце вместе с пятнами вращается вокруг своей оси.

Вращение Солнца имеет важную особенность: его различные зоны вращаются вокруг своей оси с различными периодами. Так, точки поверхности экваториальной зоны Солнца делают один оборот относительно звезд за 25,38 сут, а точки, лежащие по разные стороны экватора, движутся медленнее. И чем дальше от экватора точка, тем больше ее период обращения и, следовательно, тем меньше скорость. Период обращения точек вблизи полюсов достигает 30 сут и более. Различие скоростей на разных гелиографических широтах показывает, что Солнце вращается не как твердое тело (не так, например, как Земля) и что его поверхность может быть только газообразной. Вращение краев диска Солнца определяется по принципу Доплера; для этого устанавливают щель спектрографа на край Солнца в точке определенной географической широты; по сдвигу спектральных линий от их нормального положения определяют линейную скорость приближения к Земле или удаления от нее. Оказывается, скорость движения вещества на данной широте везде одинакова. Но почему скорость вращения Солнца уменьшается от экватора к полюсам (а период его вращения, следовательно, увеличивается), не выяснено и в наши дни.

Кроме пятен, которые, как правило, окружены более яркими образованиями — *факелами* и *флоккулами*, на Солнце часто появляются огромные газовые образования, называемые *протуберанцами*. Некоторые из них выбрасываются из Солнца и поднимаются на высоту нескольких сотен тысяч километров, другие зарождаются в атмосфере Солнца на разных высотах и затем, по-видимому, под действием электромагнитных сил движутся к его поверхности и падают на Солнце. Время существования протуберанцев от нескольких минут до одного-двух месяцев.

Одно из интереснейших явлений на Солнце — хромосферные вспышки (рис. 4). Появляются они в активных областях, содержащих интенсивно развивающуюся группу пятен (в хромосфере). Продолжительность вспышек колеблется от нескольких минут до двух-



Рис. 4. Хромосферная вспышка

трех часов. Иногда во вспышках наблюдаются быстрые движения газов и регистрируются сильные магнитные поля. Появление вспышки, особенно сильной, вызывает ряд сопутствующих явлений. Сразу после вспышки прекращается примерно на полчаса прием коротких радиоволн от далеких станций. Слышимости нет до тех пор, пока не исчезнет ионизация атмосферы в нижних слоях.

Над хромосферой расположены верхние слои атмосферы Солнца — солнечная корона, которую хорошо видно во время полных солнечных затмений. Это наиболее разреженная часть солнечной атмосферы, простирающаяся на несколько (иногда более 10) солнечных радиусов. В период максимума солнечных пятен лучи солнечной короны направлены веером во все стороны. В период минимума лучи вытянуты вдоль экватора Солнца.

Во внешних частях короны большую часть энергии уносит солнечный ветер — поток коронального газа, скорость которого растет с удалением от Солнца и достигает на поверхности Земли почти 450 км/с.

Солнечным ветром объясняется отклонение хвостов некоторых типов комет в радиальном направлении от Солнца, нагрев верхних слоев атмосферы и ионосферы Земли, постоянная возмущенность геомагнитного поля в высоких широтах.

Солнечная активность оказывает большое влияние на многие земные явления, в том числе и на процессы, происходящие в атмосфере, магнитосфере и биосфере Земли.

Для изучения явлений, происходящих на Земле и в ее атмосфере в результате активной деятельности Солнца, организованы систематические ежедневные наблюдения по сбору информации о Солнце во многих обсерваториях земного шара. В нашей стране Солнце изучается на 11 часовых поясах (от II до XII); собирается обширная информация обо всех явлениях в фотосфере и более верхних слоях (например, получают фотоизображения светлых флоккул и темных волокон, представляющих собой проектирующиеся на диск Солнца протуберанцы). Большое внимание уделяется измерению магнитных полей пятен, регистрации радиоизлучения и наблюдениям со спутников рентгеновского излучения Солнца.

Многие звезды и внегалактические объекты излучают в рентгеновской и ультрафиолетовой областях спектра, поэтому их желательно наблюдать вне атмосферы Земли, вынося на высокие орбиты большие телескопы, позволяющие вести измерения вне радиационных поясов Земли и, следовательно, без помех земной атмосферы.

23 марта 1983 г. в космос запущена астрономическая станция «Астрон», на борту которой установлен двухзеркальный телескоп длиной 4,2 м с диаметром главного зеркала 80 см, который позволяет проводить сверхточные наблюдения за звездами, туманностями и за многими процессами, происходящими во Вселенной. Эти работы ведутся по тематике Крымской астрофизической обсерватории АН СССР под руководством академика А. Б. Северного. Наряду с этими работами по изучению Солнца проводятся на высокогорных обсерваториях с помощью внезатменных коронографов; там в свете зеленой

и красной спектральных линий изучаются солнечная корона и другие вновь появляющиеся образования.

Исследованием связи солнечной активности с магнитным полем и ионосферой нашей планеты кроме астрономических занимаются и специальные магнитные обсерватории. Воздействие излучения активных областей Солнца (главным образом хромосферных вспышек) на магнитосферу и ионосферу Земли вызывает сложный комплекс явлений, к которым относятся полярные сияния, магнитные бури, ионосферные возмущения и т. п.

Солнце — ближайшая к нам дневная звезда и его параметры (светимость, спектр, масса) изучаются шире и глубже, чем параметры других звезд. Изучение Солнца — рядовой звезды позволяет глубже понять роль звезд во Вселенной.

Звезды представляют собой гигантские сконцентрированные сгустки звездного вещества, находящегося в условиях, не воспроизводимых опытным путем. Их центры — лаборатории эволюционных процессов Вселенной, где царят неизмеримо высокие давления, а следовательно, и температуры, приводящие в определенных условиях к образованию химических элементов.

Наблюдаемые звезды, как одиночные, так и системы, относятся в основном к нашей Галактике, однако Вселенная бесконечна и заполнена самыми разнообразными с физической точки зрения объектами. Это — обширный класс внегалактических туманностей, квазары, пульсары, нейтронные звезды, черные и белые дыры и т. п.

Изучение этих объектов не входит в нашу задачу, поэтому мы и не будем их рассматривать.

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТЕЙ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ

КОЕ-ЧТО ИЗ ИСТОРИИ ИЗУЧЕНИЯ ПЛАНЕТ

Пять больших планет — Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн известны с незапамятных времен; кто и когда их открыл, заметил их движение среди звезд — неизвестно, но они упоминаются во всех летописях и работах древних ученых и, следовательно, были им хорошо известны. До 1781 г. эти пять планет считались единственными. Седьмую большую планету (считаем их в порядке удаления от Солнца, включая в это число и Землю) открыл английский астроном В. Гершель с помощью своего телескопа, зеркало которого имело фокусное расстояние 2 м и диаметр 20 см. Последующие наблюдения подтвердили, что новое светило — планета, имеющая блеск шестой звездной величины, которую невозможно было обнаружить без телескопа. Новая планета, находящаяся на расстоянии 19 астрономи-

ческих единиц от Солнца¹ и имеющая период обращения 84 года, была названа Ураном.

Далее за Ураном находится Нептун — большая невидимая вооруженным глазом планета. Открытие этой планеты в середине со- роковых годов прошлого столетия явилось замечательным достижением науки и подтверждением правильности положений диалекти- ческого материализма о познаваемости мира и значении критерия практики в этом познании. В 1788 г. русский академик А. И. Лек- сель, вычисляя по наблюдениям, сделанным за последние два года, орбиту Урана, пришел к заключению, что движение Урана возму- щается какой-то неизвестной планетой. Незнакомкой, возмущающей движение Урана, интересовались в то время многие астрономы. В частности, блестящую работу по этому вопросу закончил в 1845 г. английский ученый Дж. Адамс, указавший положение неизвестной планеты на небе; однако никто из гринвичских астрономов планету не обнаружил.

В 1846 г. закончил неповторимое и блестящее исследование фран- цузский астроном У. Леверье: он вычислил элементы орбиты новой планеты и указал ее место на небе, о чем письмом немедленно со- общил в обсерваторию г. Бреслау. Получив это письмо, астроном- наблюдатель И. Галле в тот же вечер по определенным У. Ле- верье координатам направил телескоп на указанную область неба и увидел неизвестное светило (погода благоприятствовала этому от- крытию). Через пару дней, убедившись по собственному движению светила, что это планета, И. Галле оповестил мир об открытии новой планеты, получившей впоследствии название Нептун. Послед- нюю из больших планет — Плутон открыл в 1930 г. американец К. Томбо, случайно обнаруживший ее на фотографии.

Изучение поверхности планет началось с того времени, как Га- лилео Галилей впервые для наблюдения небесных тел использовал зрительную трубу. Открытие спектрального анализа, фотографии, разработка фотометрических методов астрофизических исследований в сочетании с улучшением конструкции телескопов и развитием теле- скопостроения позволили астрономам наземными средствами добыть немало сведений об общих характеристиках планет, о физических условиях на них, и в основном правильно решить вопрос о невоз- можности жизни на других планетах Солнечной системы.

Однако до выхода человека в космос Луна оставалась единствен- ным небесным телом, о поверхности которого астрономы могли рас- сказывать уверенно и в общем правильно. Но и здесь приходилось довольствоваться одной, обращенной к нам стороной Луны.

¹ Астрономическая единица длины (а. е. или а. е. д.) — единица расстоя- ний в астрономии, равная среднему расстоянию Земли от Солнца; 1 а. е. = 149 597 870 км.

Космическая техника позволила послать автоматические аппараты на Марс и Венеру, увидеть Меркурий с высоты меньшей, чем высота птичьего полета. К настоящему времени сведений о поверхностях планет земной группы уже настолько много, что о каждой из них можно писать отдельную книгу. Желая дать представление обо всех планетах, мы остановимся лишь на характерных для каждой из планет особенностях поверхности и их вращении вокруг своей оси.

МЕРКУРИЙ

В 1974—1975 гг. выведенный на орбиту вокруг Солнца американский космический аппарат «Маринер-10» 3 раза прошел мимо Меркурия. Наибольшее сближение составляло 330 км. Было получено около 2,5 тыс. снимков, сфотографировано более 50 % поверхности планеты. Разрешающая способность лучших снимков — до 50 м. На фотографиях обнаружены многочисленные кратеры, горные хребты и цирки. Размеры кратеров на Меркурии очень разнообразны по диаметрам, высотам окружающих гор и другим деталям. Некоторые кратеры имеют системы лучей, но лучи эти короче лунных из-за большой силы тяжести. Меркурий оказался очень похожим на Луну с невидимой стороны, но характерных для Луны базальтовых морей на Меркурии нет.

Определенные по длине тени высоты кратерных валов, центральных гор и обрывов значительно ниже, чем на Луне, и не превышают 4 км. Это также объясняется большей силой тяжести на Меркурии.

Диаметр наибольшего на Меркурии цирка — Знойного моря — 1300 км. Это гигантский бассейн ударного происхождения, подобный морю Дождей на Луне. Диаметр астероида, который при падении на Меркурий образовал кратер такого размера, должен был составлять 100—200 км. Антипод Знойного моря представляет собой сильно разрушенную местность. Предполагается, что во время удара в районе Знойного моря образовалась ударная волна, которая, распространяясь по поверхности планеты, обошла ее со всех сторон и сфокусировалась на противоположной от удара стороне, что и вызвало в этом месте сильные разрушения. На Луне также имеются такие разрушенные местности. Это антиподы ударных морей Восточного и Дождей.

На Меркурии часто встречаются новые для нас образования поверхности — эскарпы. Это хребты высотой 2—3 км, которые разделяют два ничем не различающихся между собой района. Протяженность таких хребтов сотни и тысячи километров. Похоже на то, что сдвиги и наползания отдельных участков коры один на другой

образовались в результате сжатия Меркурия. Это могло произойти при остывании расплавленной мантии планеты, когда (по расчетам) радиус планеты уменьшился на 2 км. Такие образования неизвестны на Луне и Марсе, но в несколько ином виде встречаются на Земле в местах столкновения материковых и океанических плит, где образуются глубоководные впадины глобальной протяженности.

Хотя не вся поверхность планеты сфотографирована, очевидно, что Меркурий, подобно Луне и Марсу, имеет асимметрическое строение поверхности: половина ее покрыта кратерами, а другая — относительно ровная — занята равнинами, покрытыми кратерами в такой же мере, как и лунные моря. Это свидетельствует о том, что равнины появились значительно позже материков и представляют собой впадины, заполненные лавой или осадочными породами. Такое асимметрическое строение с развитием одной наибольшей впадины проявляется и на Земле (Тихоокеанская впадина). Возможно, что такие впадины являются общей закономерностью в развитии планет.

Фотографические и поляризационные свойства поверхности Меркурия оказались точно такими же, как и на Луне. Видимо, вся поверхность планеты покрыта мелкозернистым реголитом. Вследствие малой отражательной способности поверхности из 9 Вт тепла, падающего на нее с солнечным излучением, около 8 Вт идет на нагрев планеты. На протяжении продолжительного дня (почти 3 мес) поверхность планеты нагревается в перигелии до 420 °С, а в афелии — до 290 °С. [Глинистые породы на Земле при такой температуре безвозвратно теряют воду (обжигаются)]. Но из-за прекрасных теплоизолирующих свойств поверхностного измельченного слоя уже на глубине нескольких дециметров температура изменяется очень мало и не превышает 70—90 °С.

После захода Солнца поверхность Меркурия быстро охлаждается: уже через 2 ч температура падает до —140 °С, а ночью достигает —180 °С.

Ночью в диапазоне инфракрасных лучей на поверхности наблюдаются яркие объекты, зафиксированные радиометром «Маринера-10». Это свидетельствует о том, что тепло сюда подходит с больших глубин по «тепловодам». Следовательно, светятся в инфракрасной области спектра сплошные скалы с хорошей теплопроводностью в отличие от окружающего их реголита, который быстро изменяет свою температуру при нагревании или охлаждении, но плохо проводит тепло. Таких скал немного, что свидетельствует об однородности поверхностного слоя планеты.

С помощью фиолетового спектрометра на Меркурии обнаружены следы атмосферы с небольшой примесью гелия. Общее давление атмосферы меньше $2 \cdot 10^{-7}$ Па (такое низкое давление еще недоступно нашей лабораторной вакуумной технике). Гелиевая атмосфера пла-

неты — это результат захвата частиц солнечного ветра гравитационным полем планеты. Из-за более высокой температуры дневной поверхности Меркурия атомы имеют здесь большие скорости (вплоть до параболических). В результате на ночной стороне Меркурия атмосфера в 30 раз плотнее, чем на дневной.

ВЕНЕРА

По данным радиолокационных исследований, переданных на Землю с борта американского космического аппарата «Пионер—Венера», который был запущен в 1978 г., построена карта рельефа поверхности планеты, охватывающая 93 % всей ее площади. 60 % поверхности планеты представляет собой относительную плоскую волнистую равнину с амплитудой высот до 1000 км, 16 % — низины, подобные земным океаническим бассейнам, остальные 24 % — возвышенности, превышающие по высоте равнины приблизительно на 1000 м, среди последних 8 % — высокогорные области. На равнинах большое число кольцевых кратеров диаметром 400—600 км и глубиной 200—700 м. Многочисленные кратеры говорят о том, что на Венере сохранилась древняя кратерированная поверхность. В отличие от кратеров Луны, Меркурия и Марса кратеры на Венере сильно сглажены. Глубина их не превышает 0,3 % от диаметра, в то время как на упомянутых планетах она достигает 3—5 %.

На всех планетах этой группы, а также на их спутниках характерным признаком поверхности являются кратеры. Поэтому мы несколько подробнее остановимся на этих образованиях. Распределение кратеров по размерам диаметра на Луне, Меркурии, Марсе свидетельствует о том, что все космические тела на ранних этапах своей истории претерпели интенсивную метеорную бомбардировку, которая, по-видимому, проходила в один и тот же период.

Ударные кратеры найдены и на Земле. Анализ космических снимков поверхности Земли позволил обнаружить более тысячи кольцевых гор диаметром от 200 до 700 км. Приблизительно 50 % из них сплошные, а остальные имеют прерывистый периметр. Кратеры, наблюдаемые на Земле, — сравнительно молодые образования. Первичные кратеры на Земле уничтожены эрозией¹. Из того факта, что на Венере в условиях густой и агрессивной атмосферы кратеры все же сохранились лучше, можно сделать общий вывод: по-видимому, основную роль в эрозии поверхности планет играет вода.

Ранее с помощью радиоинтерферометрических наблюдений, выполненных с поверхности Земли, на Венере был обнаружен гигантский грабен шириной до 200 км и глубиной 2—10 км, который тя-

¹ Эрозия — процесс разрушения горных пород и почв водным потоком.

7544

нется на 1700 км между 16—20° ю. ш. и напоминает долину Мари-
неров на Марсе или Восточно-Африканские разломы на Земле.
Радиолокаторы зафиксировали также дугообразные горные хребты,
идущие в субпараллельном направлении и разделенные долинами.
Возможно, это складчатые горы. Найдены и вулканообразные струк-
туры: 15—20 сопок сосредоточены на площади около 300 км². Сре-
динно-океанических хребтов и других структур, связанных с текто-
никой плит, на Венере не обнаружено.

Поверхность Венеры в районе посадки советских космических
аппаратов «Венера-9» и «Венера-10», которые впервые в 1975 г. пе-
редали на Землю ее изображение, представляет собой каменистую
пустыню с характерными обломками скал. Вокруг «Венеры-9» видны
россыпи камней размером в несколько десятков сантиметров. (По-
видимому, это обломки поверхностного слоя коры.) Вероятнее всего,
наблюдаемое разрушение происходит на прилегающем к месту по-
садки возвышении, а в кадр попала каменистая осыпь на склоне это-
го возвышения. Происхождение этой осыпи может быть связано как
с геологическими процессами разрушения, так и с эрозией поверх-
ностных пород под влиянием агрессивной атмосферы планеты.

Предположение о магматической природе поверхностных пород
подтверждается спектральным составом и интенсивностью γ -излуче-
ния естественной радиоактивности соединений урана, тория и калия.
По соотношению этих элементов академик А. П. Виноградов с со-
трудниками сделал вывод, что поверхность Венеры состоит из легко-
плавких базальтов. По существующим в настоящее время представ-
лениям, такая поверхность образовалась в результате дифференциа-
ции вещества планеты на оболочку и железоникелевое ядро.
Подтверждением этому служит измеренная в местах посадки сред-
няя плотность пород, которая оценивается в 2,7 г/см³ и близка к
плотности земных базальтов.

От облачного слоя планеты отражается почти 3/4 солнечной ра-
диации, из которой поверхности достигает только 3—4 %. Прони-
кающая радиация удерживается мощным атмосферным покровом
планеты. Развивается так называемый парниковый эффект. Тепло-
вые лучи не пропускают назад в космос углекислый газ атмосферы,
что приводит к значительному перегреву планеты. По данным «Ве-
неры-9» и «Венеры-10» дневная температура на Венере больше ноч-
ной всего на 2 °С, а разница между температурами на полюсе и эк-
ваторе 12 °С. Этим подтверждается наличие парникового эффекта.

По расчетам температура на поверхности Венеры из-за парни-
кового эффекта на 50 °С выше той, которую она имела бы, если бы
такого явления не было. На Земле парниковый эффект (главным об-
разом за счет водяных паров) приводит к повышению температуры
на 35 °С, а на Марсе — всего на 7 °С.

В 1983 г. 2 июня на Венеру запущена автоматическая станция «Венера-15». Преодолев за 130 сут 330 млн. км, 1 октября «Венера-15» перешла на вытянутую эллиптическую орбиту искусственного спутника Венеры с периодом обращения около 24 ч. Следовавшая за «Венерой-15» станция «Венера-16» 20 октября также переведена на вытянутую эллиптическую орбиту спутника планеты. Обе станции начали совместную работу по дистанционным исследованиям поверхности Венеры и ее атмосферы. Радиолокационной съемкой охвачена полоса длиной 9 тыс. км и шириной 150 км. Проводятся измерения температуры поверхности, изучаются состав и свойства атмосферы и облачного слоя. Интересную информацию о поверхности Венеры и ее атмосфере дадут запущенные в декабре 1984 года автоматические межпланетные станции «Вега-1» и «Вега-2».

МАРС

За несколько лет работы советские межпланетные станции «Марс-2», «Марс-6» и американские космические аппараты «Маринер-6», «Маринер-9», «Викинг-1» и «Викинг-2» сообщили о Марсе информации намного больше, чем мы получили за всю историю его телескопического исследования. На основании этих данных наши представления о поверхности Марса за последние 15 лет изменились: выяснилось, что она не похожа ни на земную, ни на лунную.

В июне 1972 г. космический аппарат «Марс-6» вышел на орбиту вокруг Марса и за 10 месяцев работы сфотографировал практически всю поверхность планеты. Им было передано около 7000 снимков с разрешением до 1 км, около 1 % поверхности снято с разрешением до 100 м. Наиболее характерные районы Марса — обширные кратерированные области, пустынные равнины, вулканические зоны, которые соответствуют различным эпохам в истории планеты. Кратерированные области распространяются от экватора до 40—50° с. ш. (марсианской) (исключение составляют две большие равнины ударного происхождения — Амазонки и Утопии) и до 80° ю. ш. Они относятся к самым старым формам рельефа, возникшим в эпоху интенсивной метеоритной бомбардировки на стадии формирования планеты. Позднее низины (в том числе и низинные области Северного полушария от 40 до 80°) были покрыты толстым слоем осадочных пород (до нескольких километров) как вулканического, так и эолового происхождения.

«Маринер-9» начал фотографирование поверхности Марса с высокогорной области Тарсис. Здесь обнаружено четыре поразительных по размерам вулкана. Наибольший из вулканов, известных пока в Солнечной системе, — гора Олимп — имеет высоту 27 км (1), что в 3 раза превышает высочайшие вершины на Земле, и диаметр более 600 км. На вершине этого вулкана находится кратер диаметром

70 км. Признаков современной вулканической деятельности марсианские вулканы не имеют.

От обширного плоскогорья Тарсис на значительные расстояния расходятся крутые обрывы, грабены, рифтовые долины, которые тянутся непрерывно и занимают до 1/3 поверхности Марса. Возле одного из гигантских вулканов — Арзия, имеющего кальдеру¹ диаметром 130 км, начинается полоса рилей (трещин) шириной до 30 км и глубиной до 2 км. Далее на восток отдельные разломы сливаются в сплошной громадный рифт, названный долиной Маринеров. Этот рифт тянется на 3600 км вдоль 10° ю. ш. Глубина его 5—7 км, а ширина достигает 200 км. Каньон продолжает обрушиваться в направлении вулкана Арзия. Его крутые склоны покрыты оврагами, на склонах видны оползни.

Характерны для поверхности Марса извилистые каналы с протоками, длина которых достигает 700 км. На Земле мы несомненно отнесли бы их к руслам рек, но при давлении марсианской атмосферы в 600 Па вода кипит при 2°C. Поэтому на поверхности Марса вода в жидком состоянии находиться практически не может. Существует несколько гипотез для объяснения наблюдаемых на Марсе русел. Одна из них допускает, что в сравнительно недалеком прошлом климат на Марсе был значительно теплее, Марс имел более плотную атмосферу, большая часть которой сейчас находится в замороженном состоянии в полярных шапках и под пылью на поверхности планеты. Данные космических аппаратов свидетельствуют о том, что полярные шапки действительно состоят из льда и замерзшей углекислоты. Другая гипотеза связана с существованием большого количества подповерхностных водных бассейнов, закрытых льдом и пылью, где вода находится под давлением. При метеоритных ударах и других катастрофах вода может вырываться на поверхность планеты и несколько суток фонтанировать со значительным дебитом. По данным некоторых зарубежных исследований первоначальная интенсивность такого потока может достигать 10 млн. м³/с.

На поверхности Марса заметны и другие следы геологической активности. От некоторых кратеров отходят потоки грязи, напоминающие снежную лавину. Их можно объяснить наличием подповерхностного льда. При ударе метеорита лед тает, массы талой воды, смешавшись с пылью, образуют грязевые потоки. С таянием подповерхностного льда могут быть связаны и наблюдаемые на Марсе провалы.

На панорамах, переданных «Викингами», заметны следы ветрового переноса песка, а с орбиты видны обширные области дюнных на-

¹ Кальдера — котлообразная впадина с крутыми склонами и ровным дном, образовавшаяся вследствие провала вершины вулкана, а иногда и прилегающей к нему местности.

носов. Длина волны в таких дюнах очень большая и достигает 1—4 км. В несколько меньших масштабах это явление встречается и на Земле в виде барханов в пустынях.

Существование каналов в таком количестве и в таком виде, как их представлял Скиапарелли в 1877 г., космические аппараты не подтвердили. Лишь один из каналов Скиапарелли совпадает с серединой долины Меринеров.

Мелкозернистый грунт в образцах из равнины Хриса (Крiza) по данным «Викинга-1» содержит кремния 20,9 %, железа 12,7 %, серы 3,1 %. По химическому составу марсианский грунт не имеет аналогов на Земле или Луне, но соотношение элементов в нем близко к каменно-метеоритному (лишь значительно больше алюминия и титана). Содержание серы в 10—100 раз больше, чем в обычных земных или лунных образцах, но все же близко к содержанию ее в хондритах. Характерный красный цвет поверхности Марса придают гидрат окиси железа (лимонит) и окиси железа, которые входят в виде примесей к основному компоненту поверхности почвы — кремнезему.

Полярные шапки четко выделяются на полюсах Марса. Наблюдения за скоростью таяния южной полярной шапки с «Маринера-9» в течение 100 сут показали, что в начале весны шапка тает очень быстро, но летом практически не изменяется. Это указывает на то, что шапка состоит из двух компонентов: замерзшей углекислоты, тающей при низких температурах, и льда, не тающего даже при повышенных температурах в летний период.

По данным «Викинга-2» температура северной полярной шапки летом составляет -68°C , что значительно выше температуры замерзания углекислоты (около -128°C), т. е. нарастающая часть шапки — ледяная. В обрывах, наблюдаемых в области шапки, видна структура наслоения в несколько сот метров, хорошо просматриваются длинные узкие долины и крутые склоны ледников. В пограничных с шапкой областях заметны следы сильной эрозии, а на крутых склонах — языки сползающих ледников.

Следовательно, воды на Марсе, по-видимому, могло быть не меньше, а даже больше, чем на Земле. Если бы весь лед растаял, то Марс, как и Земля, покрывался бы океанами и морями.

Весной при сублимации углекислоты в области полярной шапки огромные массы ее попадают в атмосферу и повышают давление над шапкой. В результате образуются сильные ветры, несущие массы газа в осеннее полушарие, где в это время идет конденсация углекислоты. При этом 2 раза в год среднее давление на Марсе изменяется от 660 до 650 Па. Такая сезонная миграция атмосферы, при которой скорость ветра достигает 100 м/с, поднимает огромное количество пыли. Пылевые бури на Марсе охватывают всю планету и продол-

жаются несколько месяцев. Буря 1971 г., которую зарегистрировал космический аппарат «Маринер-9», началась 22 сентября и стала утихать только в середине декабря, а полная видимость поверхности возобновилась только в середине января 1972 г. Во время пылевой бури развивается антипарниковый эффект, когда запыленная часть поверхности охлаждается из-за того, что облака пыли прозрачны для инфракрасных лучей и вместе с тем непрозрачны для солнечных лучей, несущих тепло на поверхность. Под пылевым облаком поверхность планеты охлаждается. Возникающая при этом разница температур между запыленной и незапыленной частями поверхности усиливает ветровые потоки в атмосфере и способствует расширению масштабов пылевой бури. Положение усугубляется из-за отсутствия воды в жидком состоянии, которая на Земле, кроме других важных функций, выполняет и функцию санитара. Осадки в виде дождя и снега очищают атмосферу Земли от пыли, а на поверхности ее вода связывает пыль, лишая ее возможности находиться в мелкой фракции. На Марсе же воды нет, и в состав марсианской (в 150 раз менее плотной) атмосферы входит мелкая фракция пыли, о чем свидетельствует своеобразное розовое небо на панорамах, переданных из равнин Хриса и Утопия. Светлое розовое небо, видимое с поверхности Марса, объясняется преимущественным рассеянием на пылинках красной части солнечного спектра, как это наблюдается и на Земле во время восхода или захода Солнца в ветреную погоду.

Наблюдения за временем оседания пылинок после бури позволяют оценить их средние размеры — радиус пылинок около 2 мкм. Во время бури разреженная атмосфера планеты поднимает с поверхности более миллиарда тонн пыли, которая составляет все же только доли процента самой атмосферы.

По наблюдениям удалось установить, что отложение пыли из атмосферы происходит преимущественно в северной полярной шапке вследствие того, что углекислота шапок усиленно захватывает пылинки, на которые уже ранее конденсировались молекулы углекислоты. Весной при сублимации углекислоты пыль освобождается. Северную полярную шапку окружает широкий пояс (до 5° по широте — 300 км) песчаных дюн. На 20 % пояс состоит из дюн высотой 50—100 м. Это самое крупное дюнное поле из наблюдающихся в Солнечной системе.

ЮПИТЕР

Из-за плотной атмосферы, окутывающей всю планету, поверхность Юпитера не наблюдается. На видимом диске атмосферы отмечается много деталей. Полосы, охватывающие всю планету по параллелям, располагаются симметрично относительно экватора и про-

стираются до широт 40—50°. В приполярных областях облака образуют более однородное поле. Темные полосы перемежаются со светлыми, которые называются зонами. По данным измерений с космических аппаратов температура в зонах на 9°С ниже, чем в однородном поле, а это значит, что они расположены на 20 км выше. Зоны и полосы — это соответственно восходящие и нисходящие потоки в атмосфере планеты, в долготном направлении охватывающие всю планету и имеющие неодинаковую скорость перемещения, т. е. ветра. Сильная конвекция в атмосфере Юпитера вызывается мощным потоком тепла из недр планеты, превышающим поток, приходящий от Солнца. Количество тепла, приходящего от Солнца на единицу площади Юпитера (51 Вт/м²), способно нагреть его поверхность до —163°С. Между тем прямые измерения наземными средствами и с помощью космических зондов указывают на температуру до —126°С. При этом конвекция в его атмосфере (как и на Сатурне) должна проникать на большую глубину, как бы пронизывая всю атмосферу единым потоком. Это обусловлено тем, что эффективность механизма молекулярной теплопроводности на четыре порядка ниже, чем эффективность конвекции, и он не смог бы обеспечить наблюдаемой температурной картины.

Измерения показывают, что на полюсах Юпитера температура на 2°С ниже, чем на экваторе. Это свидетельствует о том, что основной приток тепла приходит из недр планеты, преимущественно в области полюса и в приэкваториальных частях.

В то время как зоны и полосы непрерывно изменяются по конфигурации и цвету, скорость горизонтальных потоков в них остается приблизительно постоянной и симметричной относительно экватора. Эти образования в целом похожи на зональную циркуляцию в верхней тропосфере Земли.

Наиболее известная деталь на диске планеты — Большое Красное пятно (БКП). Это овальное образование в южной тропической зоне, которое медленно изменяет свои размеры. Сейчас его большой диаметр составляет 330 тыс. км, а в 1878 г. пятно было в 2 раза больше. Космические аппараты установили, что Большое Красное пятно представляет собой гигантский антициклон, поперечник которого составляет около четырех диаметров Земли. Атмосфера вращается здесь против часовой стрелки, и один оборот ее происходит за 6 ч. По данным американских космических аппаратов «Вояджер-1» и «Вояджер-2» скорость вращения столба вихря БКП увеличивается с глубиной. Это указывает на то, что энергия для поддержания вращения поступает снизу, а не от поверхности видимых облаков, как считалось ранее. В направлении к югу от БКП часто возникают и дрейфуют белые овальные образования меньших, чем БКП, размеров (поперечник около 14 тыс. км). Возраст овалов, которые наблюда-

ются сейчас, установленный, в частности, по ранним фотографиям и зарисовкам около 40 лет. Несмотря на то что внешне и по возрасту овалы не сходны с БКП, экспериментами «Вояджеров» установлено, что эти образования также являются антициклонами меньших размеров.

Согласно теории, разработанной Г. С. Голицыным, погодные изменения в атмосферах планет зависят от общих параметров, характеризующих эти атмосферы. На Марсе изменения погоды проходят за несколько часов, на Земле для подобных же изменений требуется несколько суток, а на Юпитере они могут осуществляться за сотни и тысячи лет. Этим объясняется чрезвычайно высокая устойчивость и большая продолжительность существования таких объектов в атмосфере последнего, как Большое Красное пятно и белые овалы.

САТУРН

Так же как и Юпитер, Сатурн скрыт от нас верхними слоями атмосферы планеты. Между прохождениями «Вояджера-1» и «Вояджера-2» (9 мес) четкость видимой поверхности облаков значительно ухудшилась, особенно в Северном полушарии. По-видимому, это обусловлено рассеянием дымки, располагающейся выше наблюдаемой поверхности облаков. Специалисты склонны объяснять этот факт наступлением весны в Северном полушарии и связанным с ней увеличением инсоляции (облучения поверхности планеты солнечной радиацией) и, возможно, фотохимической активности.

В 16° от Северного полюса наблюдался гигантский овал, получивший название Большого Коричневого пятна (по аналогии с БКП на Юпитере). Ранее «Вояджер-1» наблюдал подобное пятно на широте $55,5^\circ$ в Южном полушарии. Диаметр последнего около 6 тыс. км. Облака Сатурна и их зональное горизонтальное перемещение, обусловленное постоянно дующими в этих областях ветрами, сильно напоминает такие же явления на Юпитере. Здесь также ветры в Южном полушарии оказались симметричными северным ветрам. Однако в поведении облаков отмечаются важные отличия:

1) зональные ветры на Сатурне захватывают более высокие широты и достигают 78° , в то время как на Юпитере они утихают вблизи 60° ;

2) светлые и темные полосы на Сатурне не коррелируют с ветром, во всяком случае так, как на Юпитере;

3) обнаружены многочисленные случаи нестабильно циркулирующих вихрей, которые со временем распадаются, нередко порождая при этом меньшие вихри.

УРАН, НЕПТУН И ПЛУТОН

Уран и Нептун настолько удалены от Солнца, что детали на их дисках, относящиеся также к верхнему облачному покрову, просматриваются очень нечетко. Можно лишь уверенно сказать, что по своему общему характеру они напоминают картину, наблюдаемую на Юпитере и Сатурне. Что касается Плутона, то из-за большой удаленности и малых размеров на диске этой планеты пока не удалось уверенно зафиксировать никаких деталей.

ВРАЩЕНИЕ ПЛАНЕТ

Сведения о вращении планеты вокруг собственной оси относятся к числу важнейших характеристик, которые позволяют судить о физических условиях на планете, тепловом режиме, смене времен года, продолжительности дня и ночи. Мы привыкли к таким явлениям на Земле и знаем, что для смены времен года необходимо одновременное выполнение трех условий:

- 1) планета должна обращаться вокруг Солнца;
- 2) ось ее собственного вращения должна быть наклонена к плоскости орбиты планеты;
- 3) перемещаясь с планетой, ось должна оставаться параллельной самой себе, т. е. сохранять свое направление в пространстве.

Наклон оси и скорость вращения планеты определяют своеобразие явлений смены дня и ночи на разных географических широтах.

У Земли ось составляет с плоскостью орбиты угол $66^{\circ}33'$. Двигаясь вокруг Солнца, Земля на полгода подставляет под его лучи то Северный полюс (здесь полгода день, в Северном полушарии) на всех широтах день длиннее ночи, на поверхность попадает больше тепла, проходят весна, лето и начинается осень), то Южный (тогда все повторяется также на Южном полюсе и в Южном полушарии; в Северном полушарии в это время зима).

На экваторе день всегда равен ночи — 12 ч, а в зените Солнце бывает там только два раза в год: в полдень в дни равноденствия (21 марта и 23 сентября) — на всех широтах день равен ночи. Во все остальные дни в полдень на экваторе Солнце проходит или на север от зенита, или на юг. Дальше всего оно уходит от зенита в дни летнего (22 июня) и зимнего (22 декабря) солнцестояний — на $23^{\circ}27'$. В эти дни в полдень Солнце бывает в зените на географической широте $23^{\circ}27'$ в Северном и Южном полушариях; эти широты называются тропиками. В Северном полушарии в дни солнцестояний в полдень Солнце бывает выше (летом) или ниже (зимой), чем во все остальные дни года. В эти дни оно как бы останавливается в

своем ежесуточном приближении (или удалении) к зениту, изменяя свое движение на противоположное.

Угол наклона оси вращения планеты к плоскости ее орбиты определяют не только планетоцентрическую широту тропиков, но и широту полярных кругов, где раз в году Солнце не появляется над горизонтом или, наоборот, не заходит под горизонт — ночь или день продолжаются целые сутки. Таким образом, для Земли широта полярных кругов равна $66^{\circ}33'$.

Теперь можно сделать очень важный вывод: для каждой планеты, ось собственного вращения которой наклонена к плоскости ее орбиты на такой же угол, как и ось Земли (или близкий к этому углу), смена времен года, дня и ночи и вообще видимое движение Солнца по небу планеты проходит так же, как и на Земле. Различие будет только в продолжительности этих явлений: год и времена года будут тем длиннее, чем дальше планета от Солнца. Продолжительность суток у планет, которые вращаются вокруг оси значительно быстрее, чем вокруг Солнца, практически определяется периодом собственного вращения.

Планеты Марс, Сатурн и Нептун имеют приблизительно такие же наклоны оси к плоскости орбиты, как и Земля. Период вращения Марса на 40 мин больше, чем Земли, период вращения Сатурна у экватора 10 ч 14 мин, Нептуна — около 15,8 ч.

Если ось вращения планеты составляет с плоскостью ее орбиты прямой угол, то плоскость экватора всегда совпадает с плоскостью орбиты планеты. При этом Солнце всегда остается в этой же плоскости, как бы ни поворачивалась планета вокруг оси или какое бы положение она ни занимала на орбите. Следовательно, на такой планете Солнце может переходить через зенит только на экваторе планеты. Потому на всей планете всегда день равен ночи. На полюсах Солнце всегда будет на горизонте — здесь и только здесь не происходит смены дня и ночи. На любой широте Солнце изо дня в день будет проходить одинаковый путь. На планете не будет смены времен года. К числу таких планет в Солнечной системе относятся Юпитер, Венера и Меркурий, но вращение двух последних настолько необычное, что о них мы будем говорить отдельно.

Есть в Солнечной системе и планета «ленивица», «лежебока» — это Уран. Ось его вращения лежит в плоскости орбиты, сохраняя свое направление в пространстве при движении вокруг Солнца. Поэтому бывают периоды, когда Уран как бы катится по плоскости орбиты, но чаще, катясь по ней, «пробуксовывает».

Очень интересно проходят смены времен года на этой планете. В течение года Солнце побывает в зените над всеми районами ее поверхности, все они погружаются во мрак полярной ночи, но все ощущают и радость полярного дня. Много необычного и любопытного

можно отметить, проанализировав до конца последствия такого расположения оси вращения планеты. Предоставим читателю заполнить свой досуг этим увлекательным занятием, совершая прогулку на Уран.

Во вращении планет четко прослеживается закономерность, природа которой остается нераскрытой. Небольшие по размерам, но плотные планеты, располагающиеся ближе к Солнцу, как и Земля, вращаются значительно медленнее, чем далекие планеты-гиганты или, как их называют, планеты группы Юпитера. Немало и других загадок у космических «волчков», особенно у близких к Солнцу и медленно вращающихся Меркурия и Венеры. Для того чтобы разобраться в хитром вращении Меркурия, введившем в заблуждение астрономов почти сто лет, нам нужно разобраться в некоторых новых понятиях.

Планеты, расположенные ближе к Солнцу, обращаются вокруг него быстрее. Так, Меркурий делает полный оборот вокруг Солнца за 88 земных суток — это протяженность года на Меркурии. Земля движется медленнее, и поэтому быстрый Меркурий все время опережает ее. Интервал времени, за который он опередит Землю ровно на один оборот (на 360°), называется *синодическим* периодом обращения. Этот период для Меркурия составляет около 116 земных суток. Наблюдая Меркурий в телескоп в одном и том же положении относительно Солнца, т. е. через синодический период, итальянский астроном Скиапарелли обнаружил по деталям на поверхности Меркурия, что он всегда обращен к Земле одной стороной. Из этого был сделан вывод, что и к Солнцу Меркурий обращен одной стороной. А это означало, что он вращается в резонансе 1 : 1 и поэтому периоды его вращения вокруг оси и вокруг Солнца равны. Так считали до 1965 г. Но, проводя радиолокацию поверхности Меркурия, астрономы в 1965 г. после тщательнейших вычислений пришли к выводу, что Меркурий делает один полный оборот вокруг своей оси не за 88, а за 58,6 земных суток! Потому-то, приходя на встречу с Землей, он и успевает дважды обернуться вокруг оси ($58,6 \cdot 2 \approx 116$) и таким образом обратить к ней ту же свою сторону. Кроме того, за свой год он успевает сделать ровно полтора оборота вокруг оси ($58,6 \cdot 1,5 \approx 88$). Это значит, что за время трех оборотов вокруг оси Меркурий дважды обходит Солнце — такое движение называется *резонансным* в отношении 3 : 2. Природа его не установлена. Предполагается, что у поверхности Меркурия на небольшой глубине в одной из его сторон располагается более массивное образование («приливный горб»), чем в остальных частях планеты. Такое образование нарушает гравитационную симметрию и приводит к наблюдаемому необычному движению. Как показывают расчеты, взаимодействие между Меркурием и Солнцем достаточно сильное, чтобы обеспечить

такое явление. Определенным подтверждением выдвинутой гипотезы может быть следующее.

Меркурий движется по очень вытянутой орбите, вследствие чего расстояние его от Солнца меняется от 0,31 в перигелии до 0,47 а. е. в афелии. Каждый раз при прохождении перигелия он обращен к Солнцу то одной, то другой (противоположной) стороной, так что упоминавшийся выше «приливный горб» оказывается на прямой, соединяющей центры масс Солнца и Меркурия. Когда «горб» попадает между центрами, система находится в положении устойчивого равновесия. Если же в следующее прохождение «горб» оказывается за центром масс Меркурия, равновесие системы неустойчиво — это своеобразная «мертвая точка», пройдя которую, «горб» начинает как бы ускоренно падать на Солнце, подкручивая при этом все тело планеты. В таком синхронном режиме резонанса 3 : 2 и осуществляется движение.

Еще более загадочно вращение Венеры. Из-за мощного облачного покрова никто с Земли не видел поверхности планеты. Наблюдаемые же детали поверхности ее атмосферы неустойчивы, кратковременны и потому непригодны для определения вращения. Лишь в 1972 г. радиолокационными методами установили, что период вращения Венеры вокруг оси составляет $243,09 \pm 0,18$ земных суток, ось почти перпендикулярна к плоскости орбиты, но само вращение идет в направлении, противоположном направлению обращения вокруг Солнца. Это единственная большая планета (за исключением «лежебоки» Урана) с таким направлением вращения. К тому же оказалось, что вокруг оси Венера вращается медленнее, чем вокруг Солнца — оборот за 246,16 земных суток. И, ко всему прочему, такое движение ее находится в резонансе с Землей, а не с Солнцем! Каждый раз, находясь на наименьшем расстоянии от Земли (такое расположение называется *нижним соединением*), Венера обращена к Земле одной и той же стороной своей поверхности (рис. 5).

Чтобы разобраться в этом удивительнейшем случае, выполним простые расчеты. Интервал времени между двумя последовательными нижними соединениями равен синодическому периоду обращения. Для Венеры он составляет 583,92 земных суток. Продолжительность земного года приблизительно 365 сут (точнее, 365,25); за это время Земля 1 раз обойдет вокруг Солнца. А за синодический период, отсчитанный от нижнего соединения, когда Венера «смотрела» на Землю, последняя пройдет путь, равный 1,6 оборота ($584 : 365$). За это же время Венера пройдет путь $584 : 225 = 2,6$, т. е. обгонит Землю ровно на один оборот, как и следует из определения синодического периода. А насколько повернется за это время вокруг своей оси Венера? $584 : 243 \approx 2,4$, т. е. до трех оборотов не хватает... 0,6. Вспомнив, что Венера вращается в направлении, противоположном дви-

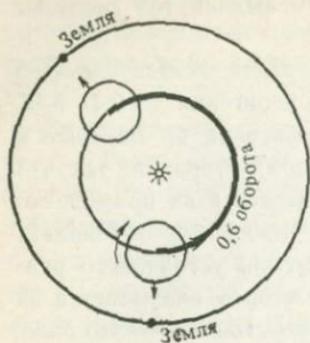


Рис. 5. На наименьшем расстоянии от Земли Венера обращена к ней одной и той же стороной своей поверхности

Солнца, можно вычислить продолжительность суток на планете (время смены дня и ночи — освещения и темноты). Для Венеры они равны 118 земным суткам, т. е. чуть ли не вдвое меньше времени вращения вокруг оси (не следует забывать о противоположности движений этой планеты).

У Меркурия полный период смены условий освещения поверхности составляет 176 земных суток. За это время он успевает дважды обежать вокруг Солнца и 4 раза повернуться вокруг оси. Но самое интересное состоит в том, что на Меркурии в течение полного периода смены условий освещенности могут наблюдаться два восхода и два захода Солнца, разделенные небольшими интервалами времени (восход — заход и снова восход или заход — восход и снова заход). Причем это всегда происходит в одном и том же месте и в одно и то же время полных суток, только один раз в первом варианте, следующий — во втором.

Причина необычного и потому удивительного явления заключается в том, что движение планеты по эллиптической орбите неравномерное. Скорость прохождения через перигелий тем больше в сравнении со скоростью прохождения через афелий, чем больше эксцентриситет орбиты. У орбиты Меркурия он самый большой — 0,2. А так как полные сутки здесь в два раза больше периода обращения вокруг Солнца, то будет наблюдаться временное ускорение и замедление последнего по меркурианскому небу. В определенные моменты и в определенных местах это может привести даже к остановке Солнца на небе, временному возвращению назад и снова к ускоренному движению в первоначальном направлении. В местах, где в это время Солнце у горизонта, и будет наблюдаться описанное явление. Всему

жению вокруг Солнца, мы приходим к выводу, что 0,6 оборота — это тот угол, который обеспечивает разворот Венеры снова «лицом» к Земле.

Причина такого удивительного резонанса непонятна и загадочна, потому что взаимодействие между Землей и Венерой, которое мы знаем (приливные гравитационные силы), очень мало для того, чтобы обеспечить в их системе такой резонанс. Высказывался ряд гипотез, в том числе и такая, что раньше Меркурий и Венера представляли одну систему, так же как Земля и Луна. Но истина еще где-то впереди.

В заключение отметим, что, рассматривая вращения планет вокруг оси и

этому способствует то, что в момент прохождения через перигелий тело Меркурия занимает одинаковое положение.

ПОЛЮСЫ МИРА: ЗЕМЛИ, ЛУНЫ, МЕРКУРИЯ, ВЕНЕРЫ, ЮПИТЕРА И САТУРНА

Основным ориентиром на небесной сфере для жителей Северного полушария Земли является *северный полюс мира*, т. е. точка, в которой ось мира пересекает небесную сферу в области созвездия Малой Медведицы. Полюс мира не участвует в суточном вращении небесной сферы, но вследствие прецессии медленно перемещается среди звезд вокруг полюса эклиптики против часовой стрелки примерно по окружности сферического радиуса $23^{\circ}27'$. В настоящее время он все ближе и ближе приближается к Полярной звезде (α Малой Медведицы) и на самое близкое расстояние ($28'$) подойдет к ней в 2100 г. В дальнейшем он будет удаляться, шествуя по созвездиям Цефей, Лебедь, Лира, и примерно через 12 тыс. лет окажется вблизи самой яркой звезды Северного полушария неба α Лиры (Вега) 0,14 звездной величины. Полный круг на сфере полюс мира опишет через 25 729 лет. Двигаясь по окружности, полюс мира совершает мелкие колебательные движения с амплитудой около $9''$ и периодом в 18,6 года, называемые нутацией. В настоящее время при ориентировании полюс мира отождествляется с Полярной звездой, являющейся путеводной звездой всех поколений мореплавателей Северного полушария Земли, хотя угловое расстояние между полюсом и Полярной звездой составляет $57'$.

Основными небесными ориентирами на Луне и планетах (рис. 6) Меркурии и Марсе должны быть звезды, так как там они видны ночью и днем. Для ориентирования необходимо составить звездные карты близполюсных зон. На Луне и рассматриваемых планетах полюсы мира не совпадают ни с какими звездами, но иногда вследствие прецессионного и нутационного движений они проходят недалеко от некоторых из них. Так, северный полюс мира Луны находится примерно в геометрическом центре трапеции звезд ζ , χ , δ и ξ созвездия Дракона и очень близок к звезде ω этого созвездия. Экваториальные координаты северного полюса Луны выражаются формулами

$$\alpha_{pЛ} = 18^h + \Omega'; \quad \delta_{pЛ} = 90^{\circ} - i,$$

где $\alpha_{pЛ}$ — прямое восхождение; $\delta_{pЛ}$ — склонение; Ω' — угловое расстояние от точки весеннего равноденствия до восходящего узла лунного экватора на экваторе Земли; i — угол наклона лунного экватора к земному экватору.

Марс имеет параметры вращения, сравнимые с земными, и вращается аналогично Земле. Ориентация же осей вращения Меркурия, Венеры, Юпитера и Сатурна немного отличается от положения в про-

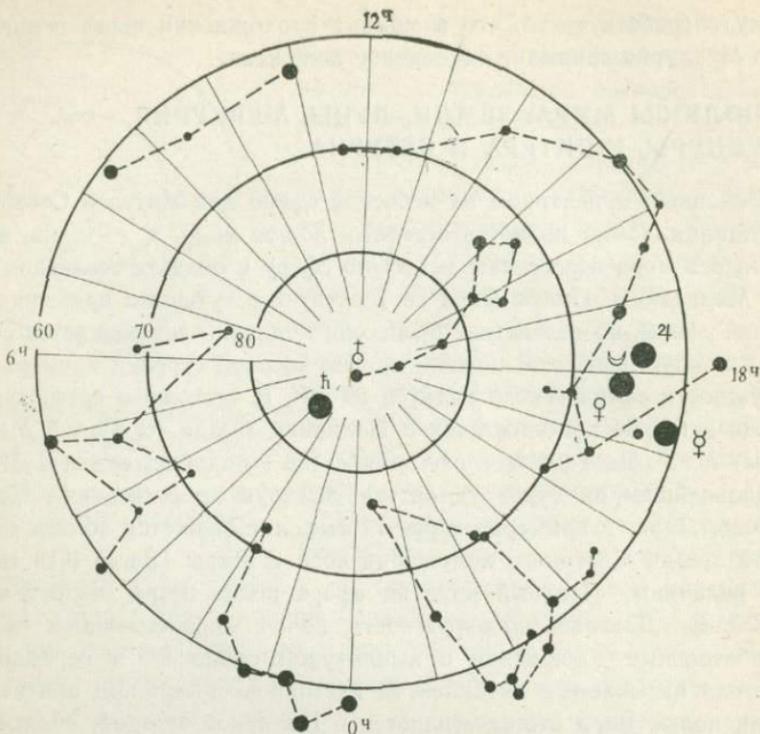


Рис. 6. Полюсы мира: Земли (З), Луны (☾), Меркурия (☿), Венеры (♀), Юпитера (♃), Сатурна (♄)

странстве оси вращения Земли, а полюсы их не удаляются более чем на 30° от положения на небесной сфере полюса Земли.

Так, полюсы мира планет Меркурия, Венеры и Юпитера находятся в области «шей» широко разбросанного околополярного созвездия Дракона, огибающего созвездие Малой Медведицы. Ничего конкретного сказать об этих полюсах мы не можем. Начиная с конца XVIII столетия разрабатывалась теория вращательного движения Земли, которая в настоящее время, можно сказать, достигла своего совершенства. Но к серьезному изучению планет мы приступили только во второй половине XX в. в связи с освоением космоса. И никакой теории вращательного движения планет у нас пока нет. Мы можем дать только экваториальные координаты полюсов планет, т. е. их прямое восхождение α и склонение δ , иначе говоря, указать их место на небесной сфере.

Планета	α , ч	δ , градус
Меркурий	18,733	61,417
Венера	18,2	66,0
Юпитер	17,872	64,548
Сатурн	2,646	83,441

ВРАЩЕНИЕ СПУТНИКОВ

Спутников в солнечной системе 34: Земля имеет один — Луну, Марс — 2, Юпитер — 14, Сатурн — 10, Уран — 5, Нептун — 2. Все спутники на различных расстояниях и с разными периодами обращаются около своих планет. Пять спутников по диаметру больше Луны. Самый большой из них, имеющий плотную атмосферу, спутник Юпитера Ио. Спутники Марса — Фобос и Деймос — замечательны своей близостью к планете и быстрым движением. Ближайший к планете спутник Фобос обращается вокруг Марса быстрее, чем Марс вращается вокруг своей оси, так что для наблюдателя, находящегося на поверхности Марса, он восходит на западе и заходит на востоке. Диаметр его около 15 км и среднее расстояние от планеты 9380 км, период его обращения вокруг Марса всего 7 ч 39 мин.

В соотношении периодов 1:1 (или как часто говорят в резонансе 1:1) вращаются спутники Юпитера (Ио, Европа, Калисто), Сатурна (Япет, Рея, Тетис), Марса (Фобос и Деймос).

Единственный спутник Земли — Луна. Она расположена от Земли на среднем расстоянии 384 400 км; ее средний радиус 1738 км, отношение массы Земли к массе Луны 81,30. Угловой радиус на среднем расстоянии от Земли — $15^{\circ}32,58''$ средняя плотность $3,34 \text{ г/см}^3$ и среднее значение ускорения свободного падения на поверхности $162,3 \text{ см/с}^2$. Луна движется среди зодиакальных созвездий с запада на восток со средней угловой скоростью $13,176^{\circ}$ за сутки и как спутник Земли обращается около центра тяжести Земли и Луны (барицентра), так как последние связаны между собой по закону всемирного тяготения. Посмотрим, далеко ли от центра Земли находится барицентр. Пусть M_L — масса Луны; M_Z — масса Земли, связанная с массой Луны соотношением $M_Z = 81,30M_L$; a_L — расстояние между центрами Земли и Луны и x — расстояние от центра Земли до барицентра. Тогда можно написать уравнение $M_Z x = M_L (a_L - x)$, откуда $x = M_L a_L / (M_Z + M_L)$. Среднее расстояние между центрами Земли и Луны 384 400 км, и x получается равным 4670 км. Так как средний радиус Земли равен 6371 км, то барицентр находится внутри Земли ближе к ее поверхности, чем к центру.

Законы вращения Луны вокруг оси были сформулированы французским ученым Дж. Кассини. Они заключаются в следующем:

1) наклон лунного экватора к эклиптике (или к орбите Земли) всегда составляет $1^{\circ}32,3'$;

2) плоскости лунного экватора, лунной орбиты и эклиптики, перенесенные параллельно в центр Земли, пересекаются по одной прямой, причем плоскость эклиптики проходит между плоскостями лунных экватора и орбиты;

3) время оборота Луны вокруг оси равно времени оборота ее вокруг Земли, т. е. Луна всегда обращена к Земле одной стороной.

Об основной особенности вращения Луны (совпадение периода вращения с периодом обращения) знали очень давно, задолго до изобретения телескопа. Считалось, что плоскость лунного экватора совпадает с плоскостью орбиты Луны и рисунок лунного диска совершенно неизменен. Более точно характер вращения Луны удалось определить тогда, когда ее начали наблюдать в телескоп и обнаружили, что контуры поверхности Луны немного перемещаются по ее диску, т. е. Луна как бы покачивается относительно среднего положения. Это явление, называемое *оптической либрацией*, открыл в начале XVII в. один из пионеров телескопических наблюдений Луны — Галилей. Но только Кассини сто лет спустя смог впервые вывести эмпирическим путем и сформулировать законы вращения Луны.

Согласно теории Кассини, Луна вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью и в том же направлении, в котором она движется вокруг Земли, а ось ее вращения медленно перемещается по круговому конусу вокруг оси эклиптики. Впоследствии, когда к Луне была применена теория вращения твердого тела вокруг центра масс, под законы Кассини была подведена теоретическая база. Основная заслуга в этом принадлежит Лагранжу, который установил также, что эти законы описывают вращение Луны в первом приближении и что должны существовать небольшие отклонения от законов Кассини (*физическая либрация Луны*).

Суть физической либрации состоит в следующем. Плоскость экватора Луны не совпадает с плоскостью ее орбиты. Кроме того, Луна, вращаясь вокруг оси сравнительно равномерно, обращается вокруг Земли с переменной скоростью, вследствие чего она несколько покачивается относительно направления на Землю. Луна не обладает полной сферической симметрией, поэтому при покачивании притяжение Земли создает в ней крутящие моменты. Величины и направления этих моментов все время меняются, из-за чего непрерывно меняются по величине и направлению возмущения во вращении Луны. Сложность их воздействия на вращение Луны усугубляется, во-первых, очень сложным характером покачивания Луны и, во-вторых, проявлением у нее гироскопического эффекта, при котором вызванный возмущением поворот может не совпадать с направлением возмущения.

Определить величину физической либрации, а вместе с тем и соотношение моментов инерции Луны, характеризующее несимметричность распределения ее массы, можно только путем наблюдений. Наблюдения для проверки теории и определения параметров вращения Луны, т. е. определения угла наклона экватора Луны к эклиптике и величины физической либрации, начаты по предложению

Лапласа в Париже в 1806 г. С тех пор эти наблюдения ведутся довольно регулярно.

В России изучением физической либрации Луны стали заниматься в конце XIX в. А. В. Краснов, А. А. Яковкин и др. Наблюдения дают наклон экватора Луны к эклиптике I и некоторую функцию главных центральных моментов инерции Луны f (связанную с амплитудой либрации) и одновременно селенографические координаты кратера Местинг А, расположенного вблизи центра лунного диска.

Однако достоверных значений параметров вращения Луны до сих пор не получено. Так, угол I получен в диапазоне $1^{\circ}28'—1^{\circ}38'$, а параметр f в диапазоне $0,6—0,9^{\circ}$, что составляет 30 % всего диапазона возможных значений этой величины.

Уточнение этих параметров — дело будущих лунных экспедиций.

ИЗ ТЬМЫ ВРЕМЕН ДО НАШИХ ДНЕЙ

НЕПОДВИЖНАЯ ЗЕМЛЯ — ЦЕНТР МИРА

Земля... Наша такая знакомая и незнакомая планета... Когда-то ее считали стоящей на трех китах, плоской, как стол, ограничивали в пространстве в меру своих познаний окружающего мира, населяли таинственными существами и искали на Земле рай и ад... И постепенно обнаруживали, что Земля почти необъятна: нигде люди не находили края Земли. Задолго до Аристотеля люди стали постепенно свыкаться с мыслью о том, что Земля — шар. Аристотель только подкрепил своим непререкаемым авторитетом сформировавшееся задолго до него мнение. Доказательства шарообразности Земли, данные Аристотелем, были примитивны, но убедительны две с лишним тысячи лет тому назад.

Христианская религия попыталась вначале опровергнуть учение Аристотеля о шарообразности Земли, но его доказательства были настолько очевидны, что церковники канонизировали учение Аристотеля о шарообразности Земли и даже об изолированности ее в пространстве. Идея гармонии мира Пифагора помогла укрепиться этому мнению, как считали, навсегда.

Возможно, задолго до Эратосфена были попытки измерить размеры Земли: у нас есть только косвенные доказательства этого.

Эратосфен (276—194 до н. э.) родился в Кирене (Африка), вместе с Аристархом был одним из наиболее выдающихся членов Александрийской академии. Он довольно точно определил размеры Земли, считая ее идеальным шаром. Для наблюдений он выбрал два пункта — Александрию и Сиену, лежащие почти на одном меридиане Земли, и определил географические широты φ_1 и φ_2 этих пунктов, а также измерил расстояние между ними. Разность географических

широт ($\varphi_1 - \varphi_2$), оказавшаяся равной $7,2^\circ$, определялась из наблюдений полуденных высот Солнца в день летнего солнцестояния. Линейное расстояние l между Александрией и Сиеной было определено по времени прохождения его караванами.

Эратосфен принял, что поверхность Земли является сферой, и определил ее радиус R по формуле $R = \frac{360^\circ}{2\pi (\varphi_1 - \varphi_2)} l$, получив для радиуса Земли значение в 39 790 стадий. По новейшим исследованиям древнеармянской литературы стадия Эратосфена составляла около 158,6 м. При этом значении стадии радиус земного шара $R = 6311$ км — точность по тем временам превосходная.

Итак, Земля — шар и имеет определенные размеры. Но этого еще недостаточно. В то время речь шла не только о шарообразности Земли, но и о движении ее в пространстве. Еще в древней Греции астроном Аристарх из Самоса (около 250 лет до н. э.) выдвинул идею гелиоцентрической системы мира, утверждая, что не темной Земле, а яркому Солнцу, дающему Земле свет и тепло, полагается быть в центре мироздания, что суточное вращение небесного свода есть кажущееся и объясняется вращением Земли вокруг своей оси. Аристарх из правильных геометрических построений, но недостаточно точных измерений нашел, что диаметр Солнца в 6—7 раз больше диаметра Земли, а диаметр Луны в 2,5—3 раза меньше земного, и что Солнце в 19 раз дальше от Земли, чем Луна.

Но почему же человечество не могло прийти к этой идее раньше? По-видимому, потому что наблюдения за небесными явлениями или земными объектами не указывали на то, что Земля движется в пространстве. Допущение движения Земли слишком противоречиво и обычным представлениям, и религиозным догмам, что в те времена имело большое значение. Поэтому на долгое время утвердилась теория неподвижной плоской Земли.

В основе любой науки лежат постулаты, не доказуемые, но весьма вероятные, подтверждаемые практикой положения. В основе древних теорий при создании систем мира тоже лежали постулаты, заключающиеся в следующем.

1. Земля имеет форму шара. Этот постулат заимствован у Пифагора. Позднее Аристотелем (334—322 до н. э.) были выдвинуты доказательства этого постулата, указывающие на закругленность Земли от востока к западу и на неодновременный восход и заход светил для всех жителей Земли.

2. Небесные тела движутся по окружностям и равномерно. Все астрономы древности и средних веков до Кеплера полагали, что все небесные движения происходят по окружностям как самым совершенным из плоских фигур. Следует заметить, что это положение справедливо, поскольку дело касается кажущегося суточного враще-

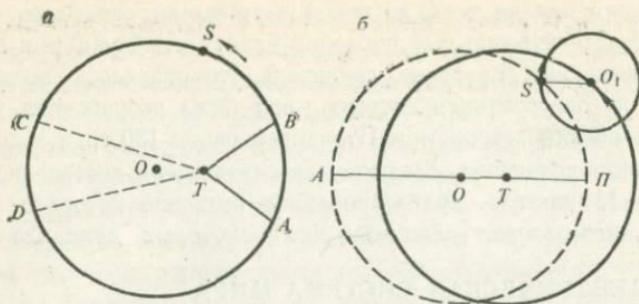


Рис. 7. Эксцентрический круг (а) и эпицикл (б).

А — афелий, П — перигелий

ния. Древние не знали, что это движение лишь кажущееся и зависит от вращения Земли вокруг своей оси.

3. Земля находится в центре мира. Этот постулат заимствован у Эвдокса и Аристотеля, которые и являются творцами теории неподвижности Земли. Доказательства этого постулата заключались в следующем: если бы Земля была не в центре мира, то на одной стороне сферы (на более близкой) звезды двигались бы быстрее, чем на противоположной. Древние астрономы не имели представления о расстояниях до звезд.

4. Земля не имеет поступательного движения. Если бы она имела такое движение, это противоречило бы предыдущему постулату.

Однако из наблюдений уже было установлено, что движения Солнца, Луны и планет неравномерны, а внешние планеты в своем движении еще делают петли, т. е. движутся прямым и попятным движением.

Для объяснения этих видимых неравномерностей движений великим александрийским математиком Аполлонием из Перги (вторая половина III в. до н. э.) были предложены два средства: эксцентрический круг и эпицикл (рис. 7). В первом варианте допускалось, что Земля T не занимает центрального положения в мироздании, а немного смещена от центра круга, чем и вызывается кажущееся неравномерное движение светил; во втором — светило движется по кругу, называемому *эпициклом*, центр которого O_1 движется по второму кругу, называемому *деферентом*, в центре которого находится Земля. Изменяя радиусы этих кругов и периоды обращения светила по эпициклу и центра эпицикла по деференту, можно получить движение, сходное с наблюдаемым. Если с помощью комбинации двух кругов еще не устраняется разница между вычисленным и наблюдаемым положением светила, то добавляют второй эпицикл, центр которого движется по первому эпициклу, и т. д.

Основная задача всей античной астрономии сводилась к тому, чтобы представить видимые движения планет комбинациями нескольких равномерных круговых движений, что оказалось возможным.

Первая согласованная система мира была разработана великим александрийским астрономом Птолемеем около 130 года н. э. В своем основном сочинении «Великое математическое построение астрономии в 13 книгах», арабизированное название которого «Альмагест», он использовал эпициклы, число которых доходило до 88.

ГЕОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА КЛАВДИЯ ПТОЛЕМЕЯ

Эта первая стройная система основана на результатах наблюдений многих поколений ученых предшествующих эпох, из которых следует отметить Пифагора, Евдокса, Аристотеля, Аполлония и Эратосфена.

Древние ученые считали, что небо, усеянное звездами, имеет сферическую форму. На основании перечисленных выше постулатов было принято, что Земля неподвижна и находится в центре мира — в центре сферы. Ближайшее к Земле небесное тело — Луна движется вокруг Земли с периодом 27,3 сут. Далее, на концентрических окруж-

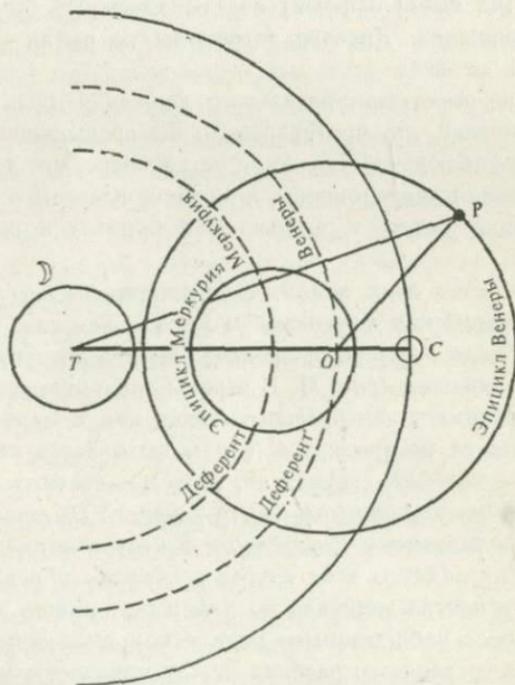


Рис. 8. Центры эпициклов Меркурия, Венеры и Солнца всегда лежат на одном радиусе TC

ностях движутся вокруг Земли Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер и Сатурн. За последним находится сфера неподвижных звезд. Для согласования видимых движений планет с вычисленными Птолемей сделал некоторые предположения.

1. Так как Меркурий и Венера никогда не уходят далеко от Солнца, было принято, что центры эпициклов Меркурия, Венеры и Солнца (C) всегда лежат на одном радиусе (рис. 8). Периоды обращений центров эпициклов по деферентам у этих трех светил были приняты равными одному году; периоды обращения Меркурия и Венеры по эпициклам равны наблюдаемым сегодняшним периодам обращения этих планет. Синодический период обращения Меркурия 116, Венеры — 584 сут. Напомним, что синодическим периодом обращения планеты называется период, по истечении которого планета возвращается в прежнее положение относительно Солнца (например, между двумя последовательными соединениями или противостояниями).

2. Радиусы эпициклов Марса, Юпитера и Сатурна всегда параллельны между собой и параллельны радиусу Земля—Солнце (TC) (рис. 9). Следовательно, периоды обращения этих планет по эпициклам равны одному году, а периоды обращения центров их эпициклов по деферентам равны наблюдаемым синодическим периодам обращения этих планет по небесной сфере (у Марса 780, у Юпитера 399 и у Сатурна 378 сут). Все эти периоды древним астрономам были

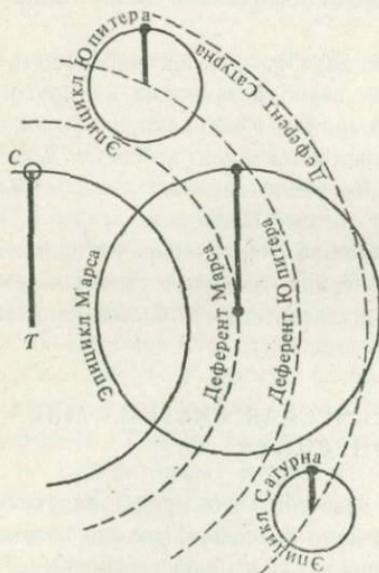


Рис. 9. Радиусы эпициклов Марса, Юпитера и Сатурна параллельны между собой и параллельны радиусу TC

хорошо известны из наблюдений. В этом суть великого геометрического построения, как называли в те далекие времена систему мира Птолемея. Она представляла собой удобное средство вычисления видимых с Земли положений планет в любые моменты времени с точностью наблюдений, доступной для того времени.

Вращение — свойство, присущее в той или иной степени всем большим планетам Солнечной системы и большинству их спутников; присуще оно и Земле, возникнув у последней в процессе ее формирования. Появившееся на Земле человечество понятия об этом не имело и верило только в то, что воспринималось зрением. Такое положение сохранялось по крайней мере до VI в. до н. э., когда первые греки Пифагор, Филолоя, Аристарх, Эндокс усомнились в центральном положении и неподвижности Земли. Однако лишь в самом начале XVI столетия Коперник (1473—1543) впервые после многолетних трудов сформулировал гениальные гипотезы о вращении Земли вокруг своей воображаемой оси и движении ее вокруг Солнца. Мы не оговорились, именно гипотезы — иначе нельзя было назвать его учение, которое имело лишь большую вероятность в силу своей простоты и естественности. Коперник сделал следующие предположения.

1. Земля есть одна из планет и обращается вокруг Солнца как центра. Следовательно, истинный центр планетных движений есть Солнце, а не Земля.

2. Суточное обращение небесного свода только кажущееся и обуславливается суточным обращением Земли вокруг оси, проходящей через ее центр.

Каждое из этих двух положений могло быть обосновано отдельно, и каждое было верно независимо от другого. Строгих доказательств этих положений у Коперника не было, но они значительно проще и естественнее объясняли небесные движения планет и поэтому казались более убедительными и вероятными, чем положения и доказательства в системе Птолемея.

Заметим, что прошло около четырех с половиной столетий с того времени, когда Коперник создавал свою систему, но, как это ни странно, строгих доказательств его положений нет и сейчас.

ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МИРА НИКОЛАЯ КОПЕРНИКА

Давным-давно известно, что представляет собой система мира Коперника, однако мало кто знает, как она возникла.

Коперник, в юности увлекшись астрономией, стал разыскивать астрономическую литературу и естественно натолкнулся на великое творение Птолемея — «Альмагест» (на арабском языке), но чуть

позднее обнаружил, что оно уже в 1515 г. переведено в Венеции на латинский язык. В «Альмагесте» подробно изложена система мира Птолемея и даже даны некоторые комментарии, относящиеся к ее созданию. Коперник в течение длительного периода до мельчайших подробностей изучал этот великий труд, поражаясь трудолюбием и изобретательности автора — выдающегося ученого древности. Система Птолемея оказалась выдающимся творением, но практическое использование ее было до крайности трудным. Система мира Птолемея так заинтересовала Коперника, что он поставил целью своей жизни изучить и усовершенствовать эту систему и особенно ее математическую сущность. Не случайно основным математическим аппаратом для представления движений планет у него осталась та же теория эпициклов, что и у Птолемея. Никакого другого математического аппарата, кроме геометрии древних, в то время не было.

В системе мира Птолемея времена обращения верхних планет (Марса, Юпитера и Сатурна) по эпициклам равны временам обращения центров эпициклов нижних планет (Меркурия и Венеры) по их деферентам и, следовательно, те и другие равны одному году.

Коперник понял, что эти соотношения не случайны — они как бы связывают планеты в одну систему и подчеркивают особую роль Солнца в этой системе. Соотношения были известны давно, но до Коперника не были ни объяснены, ни использованы. Лишь он понял, что здесь мир впервые связан в одно органическое целое, а непонятные эмпирические зависимости освещают путь к дальнейшему его пониманию.

По первой особенности системы мира Птолемея центры эпициклов планет Меркурия и Венеры всегда находятся на прямой Земля — Солнце, иначе говоря, они всегда находятся в нижнем соединении с Солнцем, т. е. Меркурий и Венера никогда не отходят далеко от Солнца. Поэтому основное внимание Коперник обращал на треугольник для внутренней планеты, например Венеры, сторонами которого являются: радиус деферента Венеры $R=TO$, радиус ее эпицикла $r=OP$ и направление с Земли на планету TP (см. рис. 8). Коперник пришел к совершенно простой мысли. Если одинаково изменять все стороны треугольника (подобие треугольников), направление с Земли на планету не изменится. А раз так, то можно увеличить или уменьшить стороны треугольника в такое число (целое или дробное) раз, чтобы центр эпицикла Венеры совпал с центром Солнца. Все остается, как было, но Венера начнет вращаться вокруг Солнца. Такая же картина будет с Меркурием. Таким образом, произойдет перестановка центра вращения планет. В этом суть великого открытия Коперника.

Как же поступить с центрами эпициклов верхних планет (Марс, Юпитер и Сатурн)? Спасает положение вторая особенность систе-

мы мира Птолемея: радиусы эпициклов этих планет параллельны прямой Земля—Солнце. Значит, нужно совместить центр эпицикла планеты с центром Земли, для чего эпицикл планеты нужно сделать ее деферентом, а деферент — эпициклом; планета окажется на прямой ТС, т. е. Земля — Солнце. После этого верхние планеты приобретут первую особенность системы мира Птолемея (так как все они лежат на прямой Земля — Солнце) и можно увеличить (или уменьшить) радиусы их деферентов в такое число раз, чтобы центры их новых эпициклов совпали с центром Солнца — точнее, с центром эпицикла Солнца.

Следовательно, получилось, что планеты вращаются вокруг Солнца, а последнее вращается вокруг Земли, увлекая за собой планеты (система мира Тихо Браге).

Перед Коперником встала картина: с одной стороны, Земля, по выражению Птолемея, «лишь точка сравнительно со сферою света», а с другой — гигантский стержень длиной в астрономическую единицу, на конце которого вместе с Солнцем, движущимся вокруг Земли со скоростью 30 км/с, движутся все большие и малые планеты, их спутники и все, что принадлежит к этой системе.

Любой образованный человек, не говоря уже о Копернике, оказавшийся в подобной ситуации, понял бы, что движется точка — Земля, а Солнечная система занимает среди звезд, подобающее ей место.

Для создания гелиоцентрической системы мира потребовалась одна жизнь — жизнь Коперника. Но для доведения ее до умов человеческих, до признания всеми, до торжества ее потребовалось по крайней мере несколько столетий. (Не следует забывать, что в то время огромную роль играла религия, тормозившая развитие науки.)

Коперник обнародовал свою гелиоцентрическую систему мира в 1543 г. в сочинении «Об обращениях небесных сфер». Спустя некоторое время великий астроном-наблюдатель Тихо Браге, наблюдения которого приобрели значение главным образом потому, что дали Кеплеру материал для открытия законов планетных движений, возражал Копернику, говоря, что если Земля движется вокруг Солнца, то, значит, каждую звезду мы в разные ночи года видим по разным направлениям. Следовательно, координаты звезд (особенно долготы) должны периодически меняться, что не было обнаружено самыми точнейшими наблюдениями того времени.

В 1572 г. Тихо Браге на основании своих многочисленных наблюдений Новой звезды, вспыхнувшей в этом году в созвездии Кассиопея (которую можно было наблюдать даже днем), и наблюдений Солнца доказывает, что в центре мироздания находится Земля, а не Солнце, как это утверждал Коперник. Вот это доказательство.

Допустим, что прав Птолемей, и в центре мироздания находится

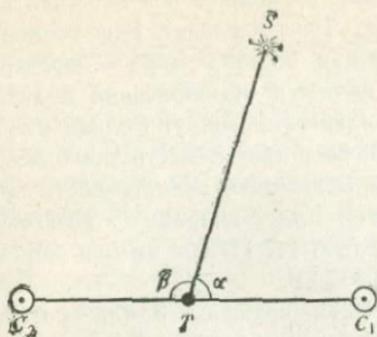


Рис. 10. В центре мироздания находится Земля T ; Солнце движется вокруг Земли

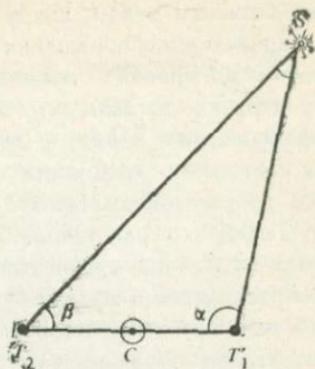


Рис. 11. В центре мира находится Солнце C ; Земля движется вокруг Солнца как одна из планет

Земля T , а Солнце движется вокруг Земли, занимая через интервал в полгода положения C_1 и C_2 (рис. 10). Тогда сумма измеренных через полгода углов α и β между направлениями на Солнце и Новую должна равняться $2d$.

Если прав Коперник, и Солнце C находится в центре Вселенной, а Земля движется вокруг него, занимая через интервал в полгода положения T_1 и T_2 (рис. 11), то сумма углов α и β между направлениями на звезду и Солнце должна быть меньше $2d$.

Все приведенные Тихо Браге многочисленные измерения давали сумму углов $\alpha + \beta = 2d$. На основании этого он сделал вывод: прав Птолемей, а не Коперник; значит, Земля находится в центре мироздания. Тихо Браге думал обнаружить параллакс звезды, т. е. малый угол в прямоугольном треугольнике, в котором гипотенуза есть расстояние от Солнца до звезды, а малый катет — расстояние от Солнца до Земли, но из-за недостаточной точности наблюдений и отсутствия представлений о расстояниях до звезд впал в грубую ошибку.

Были и противники системы мира Коперника, например Гиссенди, Риччиоли, Бульо и др. Учение Коперника преследовалось инквизицией, пославшей в 1600 г. на костер Джордано Бруно и заставившей в 1633 г. Галилео Галилея отречься от всех своих «заблуждений и ересей», но истина восторжествовала. Гелиоцентрическая система мира победила.

Она помогла объяснить истинное устройство Солнечной системы, в частности движение всех планет, в том числе и Земли. Согласно геоцентрической системе мира Земля занимала совершенно исключительное положение во Вселенной, являясь в ней тем единственным

неподвижным телом, вокруг которого вращалась вся небесная сфера, происходили обращения Солнца, Луны и планет. Революционное учение Коперника — гелиоцентрическая система мира — опровергло эту теорию, доказав, что Земля является обыкновенной планетой, обращающейся наряду с другими планетами вокруг Солнца и своей оси. По счету от Солнца она занимает третье место, находясь от него на расстоянии 149 597 870 км. Вследствие эллиптичности орбиты Земли это расстояние изменяется: на ближайшем расстоянии Земли от Солнца в перигелии оно равно 147 117 000 км при наибольшем расстоянии в афелии — 152 083 000 км.

Как стало выясняться в дальнейшем, вращение Земли оказалось значительно сложнее, чем думали Коперник и его последователи.

Еще во II в. до н. э. Гиппарх из сравнения координат звезд, полученных в разные эпохи, нашел, что земная ось не сохраняет неизменного положения в пространстве, а медленно перемещается вокруг оси эклиптики, совершая полный оборот, как позднее было уточнено, за 25 729 лет. Это явление было названо *прецессией*.

В 1737 г. Дж. Брайль открыл небольшие колебания оси вращения Земли, которые накладываются на прецессионное движение оси вращения, главный член которых имеет период колебаний 18,6 года. Это движение земной оси было названо *нутацией*.

Начало теоретическому исследованию вращения Земли положил Л. Эйлер, применив в 1758 г. к Земле разработанную им теорию вращения абсолютно твердого тела вокруг неподвижной точки — центра тяжести тела. Решение дифференциальных уравнений для Земли как для абсолютно твердого тела при условии, что на земной сфероид не действуют внешние силы, впервые привели Эйлера к выводу, что в этом случае мгновенная ось вращения Земли может описывать конус около наименьшей оси главного момента инерции земного сфероида с периодом, равным приблизительно 305 звездным суткам. Этот период называется *периодом Эйлера*.

В действительности Земля не абсолютно твердое, а упругое, способное деформироваться тело. Это отличие свойств реального тела Земли от абсолютно твердого удлиняет период, названный *свободной нутацией*, примерно до 438 сут.

Сложность внутреннего строения Земли приводит к появлению еще одного периода, обнаруженного уже в наше время, почти точной (23 ч 56 мин звездного времени) свободной нутации.

Различного рода атмосферные явления, циркуляция атмосферы, смена времен года и т. д. вызывают еще так называемую *сезонную неравномерность* вращения Земли — в апреле Земля вращается чуть быстрее (сутки короче), а в августе чуть медленнее (сутки длиннее). Обо всем этом пойдет речь в следующих разделах.

ФОРМА ЗЕМЛИ И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

Для жителей Северного полушария вращение Земли происходит с запада на восток, т. е. против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса. Ось вращения, точнее прямая, которая параллельна оси вращения Земли, проходит через ее центр тяжести и при продолжении в обе стороны пересекает небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках, называемых полюсами мира. Тот полюс, относительно которого вращение небесной сферы происходит против часовой стрелки (для наблюдателя, находящегося в центре небесной сферы), называется *северным полюсом мира*, противоположный — *южным полюсом мира*. Полюсы мира медленно перемещаются вследствие прецессии.

Какую же форму имеет эта вращающаяся около своей оси планета, именуемая Землей? Человечество давно интересовалось этим вопросом, но до XVII столетия — безрезультатно. XVII век дал миру И. Ньютона, который сформулировал закон всемирного тяготения. Ньютон же первым указал на то, что Земля как тело вращения должна быть сплюснута с полюсов.

Чтобы установить размеры и истинную форму Земли, нужно было измерять большие расстояния (в сотни километров). Это стало возможным лишь после того, как голландский геодезист В. Снеллиус в начале XVII столетия изобрел способ измерения больших расстояний (в 1615—1617 гг. произвел в Голландии градусное измерение), положивший начало геодезии и сыгравший колоссальную роль в развитии знаний о фигуре Земли — триангуляцию, суть которой заключается в следующем. Для того чтобы измерить большое расстояние MN , предварительно намечаются на местности в направлении MN пункты A, B, C и т. д. (рис. 12) на расстоянии 10—30 км и более друг от друга. В этих пунктах строятся пирамидальные вышки, так называемые *геодезические сигналы*, высотой в зависимости от рельефа местности от трех до нескольких десятков метров. На верху вышки или геодезического сигнала имеется специальный столик для установки геодезического инструмента, с помощью которого измеряются горизонтальные углы между направлениями на другие сигналы.

Затем со всей возможной точностью на очень ровной местности, а иногда даже на льду озера с помощью мерной ленты измеряется одна из сторон

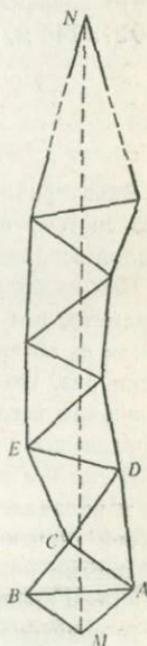


Рис. 12.
Триангуляционная сеть

треугольника, так называемый базис AB или DE , протяженностью около 10 км. С помощью измеренного базиса и углов треугольников вычисляются стороны всех треугольников (расстояния между сигналами) и, наконец, расстояние между крайними точками MN .

Используя способ триангуляции, Пикар во второй половине XVII столетия (1669 г.) произвел первое точное градусное измерение во Франции, измерив дугу меридиана от Парижа до Амьена, причем впервые были употреблены угломерные приборы, снабженные зрительными трубами.

Градусные измерения XVIII в. в Перу и Лапландии, сделанные с величайшей тщательностью с помощью специально для этой цели построенных точных оптических измерительных приборов, окончательно прояснили вопрос о форме и размерах Земли: Земля — эллипсоид вращения с довольно хорошо измеренными полуосями...

Один из важнейших параметров Земли — ее сжатие или сплюснутость, определяемые как отношение разности между большой и малой полуосями a_e и b к большой полуоси a_e . Эллипсоид вращения с малым сжатием при совпадении плоскости его экватора с экватором Земли и при совпадении их малых осей, как уже было сказано, называется сфероидом.

По современным данным экваториальный радиус Земли $a_e = 6\,378\,140$ м, $b = 6\,356\,755$ м. Следовательно, сжатие

$$\alpha = \frac{a_e - b}{a_e} = \frac{1}{298,257}.$$

Экваториальный радиус Земли и ее сжатие α входят в современную систему астрономических постоянных, причем a_e является первичной основной постоянной, а α — производной.

Чем на большем наблюдательном материале получен тот или иной параметр, тем выше его точность. Например, экваториальный радиус Земли a_e со времени изобретения XVII в. триангуляции определялся сотни раз. Но измерения его продолжают и по сей день, так как с началом исследования космоса возросли требования к точности его определения.

В связи с обнаружившимся фактом сплюснутости Земли не только в направлении ее полюсов, но и по экватору (хотя и в очень слабой степени) иногда используют трехосный эллипсоид с тремя неравными полуосями a , b и c , наименьшая из которых c направлена по оси вращения Земли.

В практике используется трехосный эллипсоид, параметры которого получены из градусных измерений, проведенных на территории СССР, в странах Западной Европы и Северной Америки советскими геодезистами под руководством Ф. Н. Красовского, и имеют следую-

щие значения: $a = 6\,378\,245$ м, $b = 6\,356\,863$ м и $\alpha = 1/298,257 = 0,003\,352$.

Наибольший и наименьший радиусы экватора, т. е. a_{\max} и a_{\min} , отличаются один от другого на величину, не превосходящую 200 м. Поэтому сжатие экватора $f = (a_{\max} - a_{\min})/a_{\min} = 1/30\,000$.

Приведем сведения о других параметрах Земли: средний радиус (радиус равновеликого шара) $a_{\text{ср}} = 6\,371\,110$ м, длина меридиана эллипсоида 40 108 550 м, площадь поверхности $5,1 \cdot 10^8$ км², объем $1,083 \cdot 10^{12}$ км³, средняя плотность 5518 кг/м³, ускорение свободного падения на экваторе 9,78049 м/с², на полюсе — 9,83235 м/с², стандартное — 9,80665 м/с².

Угловая скорость вращения Земли для современной эпохи равна $7\,292\,115 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. Она с течением времени изменяется в основном из-за неравномерности вращения Земли.

Центробежное ускорение вращения Земли на экваторе достигает 3,392 см/с²; на полюсах Земли оно равно нулю.

Продолжительность одного оборота земного шара относительно звезд, окружающих Солнце, составляет 24 ч 0 мин 0,0084 с среднего звездного времени, причем избыток в 0,0084 с над 24 часами вызывается явлением прецессии. По среднему солнечному времени продолжительность одного оборота Земли 23 ч 56 мин 4,09 с. Ось вращения Земли не сохраняет своего направления в пространстве и смещается вследствие прецессии и нутации в теле Земли (движение полюсов). Линия узлов, по которой плоскость экватора Земли пересекается с плоскостью эклиптики, медленно движется по эклиптике (рис. 13) с востока на запад, перемещаясь по $1^{\circ}23'57,08''$ в столетие, вследствие чего угол прецессии изменяется на 360° за 25 729 лет. Поэтому звездные сутки на 0,0084 с короче периода вращения Земли.

ФАКТЫ — УПРЯМАЯ ВЕЩЬ!

СИЛЫ ИНЕРЦИИ — ЦЕНТРОБЕЖНАЯ И КОРИОЛИСОВА

Земля вращается вокруг своей оси с ускорением $r\omega^2$, где r — радиус любой точки на поверхности или внутри нее, а ω — угловая скорость вращения Земли. Ускорение по второму закону динамики всегда связано с силой. Какие же силы появляются при вращении Земли? Это силы инерции — центробежная и кориолисова, возникающие только во вращающихся системах. В данном случае они своим действием оттягивают частицы вещества от полюсов к экватору, растягивая таким образом Землю по экватору. Поэтому сплюснутость Земли является доказательством ее вращения.

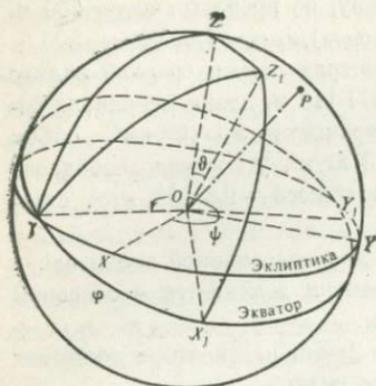


Рис. 13. Линия узлов орбиты Земли движется по эклиптике с востока на запад, перемещаясь на $1^{\circ}28'57,08''$ в столетие

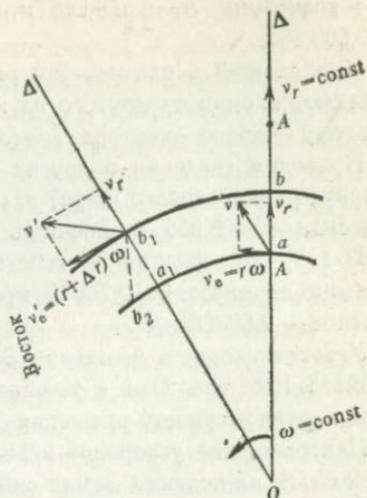


Рис. 14. Силы инерции возникают только во вращающихся системах

Силы инерции, как центробежная, так и кориолисова, возникли одновременно с вращением Земли, но обнаружены они были в первой половине XIX в. французскими учеными Понселе и Кориолисом.

Центробежная сила инерции всегда направлена по главной нормали к траектории от центра кривизны в сторону выпуклости кривой. Благодаря ей при сильном вращении разрываются маховики, слетают предметы с вращающейся горизонтальной платформы. Значение этой силы определяют из выражения $mv^2/r = mr\omega^2$, где v — скорость тела, r — радиус окружности и ω — угловая скорость вращающейся системы.

Сила инерции Кориолиса возникает, когда по поверхности вращающейся Земли движется точка или тело, например по меридиану с севера на юг (рис. 14). Тогда она в относительном движении переходит с параллели с одной линейной скоростью $v_e = r\omega$ на параллель с другой скоростью $v_e' = (r + \Delta r)\omega$ (с меньшей на большую) и модуль этой скорости возрастает. Кроме того, из-за вращения с угловой скоростью ω происходит изменение направления относительной скорости v_r ; эти два изменения переносной и относительной скоростей в результате порождают ускорение Кориолиса. Таким образом, причиной ускорения Кориолиса w_c является то обстоятельство, что

движущаяся по вращающемуся около оси стержню OA точка A переходит с траектории с $v_e = r\omega$ на траекторию со скоростью $v'_e = (r + \Delta r)\omega$ (с меньшей на большую или наоборот). Если бы стержень OA не вращался, а двигалась только точка A со скоростью v_r , ускорения ω_c не было бы. Ускорение Кориолиса в этом движении $\omega_c = 2\omega v_r$, где v_r — относительная скорость точки A вдоль стержня. Нагляднее это можно показать на рис. 14. Когда движущаяся по стержню точка занимает положение A , ее полная (абсолютная) скорость равна v ; если точка передвинулась в положение b_1 , ее абсолютная скорость v' совершенно другая. Изменение скорости — это и есть ускорение Кориолиса ω_c . Но ускорение по основному закону динамики связано с силой, которая пропорциональна этому ускорению. Это и будет сила Кориолиса, неотъемлемая спутница движения тела при вращающихся системах, благодаря которой Земля и приобретает сплюснутую форму.

ОТКЛОНЕНИЕ ПАДАЮЩИХ ТЕЛ К ВОСТОКУ

Есть основания предполагать, что отклонение падающих тел от вертикали к востоку, как следствие вращения Земли вокруг оси, изучалось еще Галилеем, использовавшим для этой цели Пизанскую башню, высота которой 54,5 м. Более точные наблюдения этого явления были проведены в 1791 г. итальянским ученым Д. Гильменини и другими учеными.

На невращающейся Земле все тела под действием силы тяжести падали бы вертикально независимо от высоты падения.

Если, например, вертикальная башня стоит на экваторе, то вследствие вращения вершина башни будет описывать большую, чем основание, дугу: $bb_1 > aa_1$. Брошенный из точки b_1 камень (рис. 15) сохраняет то относительное движение, которое он имел вместе с вершиной до своего падения; поэтому за время t он переместится на расстояние bb_1 и упадет в точке b_2 , определяемой из условия $ab_2 = bb_1$. А так как за то же время основание башни переместилось в точку a_1 , то, следовательно, камень опередит основание на дугу a_1b_2 к востоку, т. е. в направлении вращения.

Отклонение падающих тел к востоку, выражаемое в миллиметрах, равно $0,022h\sqrt{h}\cos\varphi$, где h — высота падения в метрах, φ — широта места наблюдения. Таким образом, на экваторе, где $\varphi = 0$, тело, падая с башни высотой $h = 100$ м, отклонится от основания башни на 22 м. Это происходит вследствие вращения Земли. Если башню поставить на полюсе Земли, где $\varphi = 90^\circ$, то тело будет падать строго по направлению отвеса. На средних широтах отклонение падающего с высоты тела будет пропорционально косинусу широты.

МАЯТНИК ФУКО

Впервые опыты с маятником провели Вивiani во Флоренции в 1661 г. и Бартолини в 1833 г. Эти опыты не были описаны, и, по-видимому, Фуко в 1850—1851 гг. о них ничего не знал. Он вывел формулу $\alpha = a \sin \varphi$, показывающую, что отклонение маятника пропорционально синусу географической широты. (В этой формуле α — угол изменения направления маятника, a — угол поворота Земли, φ — широта места наблюдения.) Это и было наглядно продемонстрировано с помощью маятника Фуко.

Маятник Фуко представлял собой тяжелый симметричный груз, обычно шар, подвешенный на тонкой длинной стальной проволоке в защищенном от ветра помещении. В основе опыта лежит физический закон — свойство маятника сохранять плоскость своих колебаний. Маятник должен иметь одинаковую возможность качаться во всех направлениях, поэтому его укрепляют либо на карданном шарнире, либо на горизонтальном шарикоподшипнике, поворачивающемся вместе с плоскостью качания маятника. Перед пуском маятник, имеющий форму шара, опоясывают по экватору тонкой бечевкой, отводят в сторону и привязывают к креплению. Чтобы освободить его для опыта, бечевку пережигают. Под маятником устраивают слегка чашеобразный помост, диаметр которого несколько превышает размах колебания, по краю помоста насыпают валик песка или прикрепляют бумажную ленту.

При колебании маятника наблюдатель, вращающийся вместе с Землей, видит постепенное изменение относительно окружающих

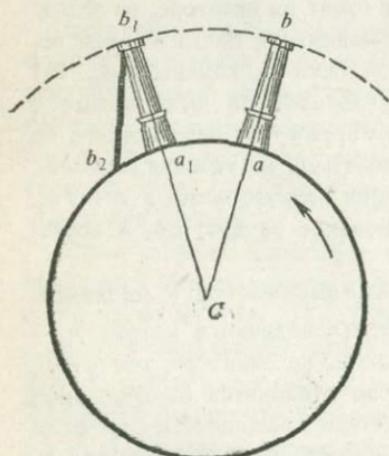


Рис. 15. Отклонение падающих тел к востоку

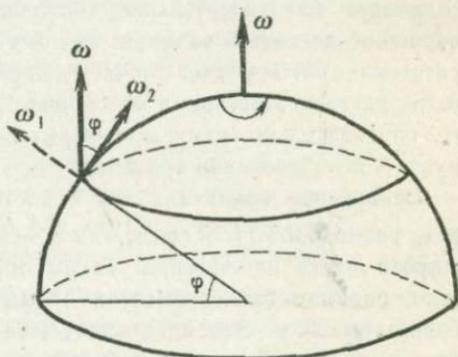


Рис. 16. Маятник Фуко.
Относительно звезд плоскость качания маятника вращается с угловой скоростью ω_2

предметов направления качаний маятника. При каждом размахе прикрепленное под маятником острое или чернильное приспособление прочерчивает черту на песке или отметку на бумаге, что наглядно показывает поворот помоста вместе с Землей против часовой стрелки и демонстрирует вращение Земли в этом же направлении.

Если поместить маятник на полюсе Земли так, чтобы в плоскости его качания находилась какая-либо звезда, то она будет всегда оставаться в этой плоскости. Наблюдателю будет казаться, что плоскость качания маятника непрерывно поворачивается в направлении, противоположном вращению Земли относительно звезд со скоростью 2π радиан или на 360° в звездные сутки (на 15° в час).

У маятника, помещенного на экваторе, вращение плоскости качания вообще отсутствует; относительно земных предметов она будет сохранять одно и то же положение.

Угловая скорость вращения плоскости качания маятника зависит от географической широты места, где смонтирован маятник. Рассмотрим качание маятника, установленного в Северном полушарии на широте φ . Разложим угловую скорость вращения Земли ω в месте, где установлен маятник, на две составляющие: вертикальную ω_1 и горизонтальную ω_2 (рис. 16). В отношении вертикальной составляющей вращения Земли ω_1 все будет обстоять так же, как и на полюсе. Относительно звезд плоскость качания маятника будет вращаться с угловой скоростью ω_2 . Земля же будет «уходить» из-под плоскости качания маятника с угловой скоростью ω_1 , которая, как видно из рис. 16, равна $\omega \sin \varphi$, где φ — широта данного места. Поэтому угловая скорость вращения маятника на всех широтах между полюсом и экватором будет меньше, чем на полюсе. Для Москвы, например, $\sin \varphi = 0,83$ и плоскость качания маятника совершила бы полный оборот за 29 часов (в Москве $\varphi = 55^\circ 45'$, $\sin \varphi = 0,83$; следовательно, число часов $= 24 / 0,83 = 29$). На полюсе $\varphi = 90^\circ$, $\sin \varphi = 1$ и число часов $24/1 = 24$.

При движении маятника от крайней точки к средней его груз под действием силы Кориолиса в Северном полушарии Земли отклоняется вправо и проходит поэтому немного правее точки равновесия, совершая не плоские, а конические колебания. Для того чтобы отклонение маятника было ничтожным, его длина должна быть значительно больше амплитуды качаний.

РАЗМЫТИЕ БЕРЕГОВ РЕК И ДРУГИЕ АНАЛОГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Кориолисовой силой объясняется различный характер берегов рек. У рек в Северном полушарии, текущих с севера на юг, правый берег обычно более крутой и размытый, чем левый (закон Бэра). Ко-

риолисова сила прижимает воду к правому берегу и подмывает его. Вековое действие этой силы заставляет реки мало-помалу изменять свое ложе со сдвигом в правую сторону; вследствие этого слева освобождается пологий берег, появляются песчаные отмели, зачастую с зарослями кустарников. Известно, например, что у Волги гористые правые берега и низкие левые. Такая же картина наблюдается в большей части течения рек Днепра, Дона, Оби, Иртыша, Лены и Дуная, которые имеют высокий правый и низкий левый берега. В Южном полушарии Земли, наоборот, — размыты левые берега и более пологи правые.

Размыв берегов рек с точки зрения количественной характеристики прямо пропорционален массе движущейся воды и явно заметен только в долинах крупных рек, почти не проявляясь на малых реках.

Аналогичное явление наблюдается на железной дороге. Поезд, двигаясь в направлении меридиана с севера на юг, принимает участие во вращении Земли; его линейная скорость, обусловленная вращением Земли, возрастает. Правый рельс стирается больше потому, что рельсы, участвуя во вращении Земли, «уходят» из-под поезда влево и из-за этого правый рельс прижимается к реборде колеса.

Точно так же объясняются искривления направления постоянных пассатных ветров, дующих с севера на юг и с юга на север. Как уже хорошо изучено, при вращении Земли линейная скорость вращения на параллелях увеличивается от полюсов к экватору; на полюсе она равна нулю, на широте 50° — 300, а на экваторе 465 м/с. Всякая точка, имеющая скорость вращения своей параллели, стремится сохранить эту скорость при всех условиях. При перемещении по меридиану от полюса к экватору любой объект попадает в области с большей скоростью, а потому отстанет от начального меридиана к западу. Это обстоятельство, обусловленное вращением Земли, вызывает постоянство направления пассатных ветров. Нагретые в экваториальной области воздушные массы устремляются вверх, а в образовавшееся разреженное пространство движутся более холодные массы от средних широт с севера и юга. Если бы Земля не вращалась, воздушные массы двигались бы по меридианам и ветры были бы северные и южные. В действительности приходящие с севера воздушные массы из-за вращения Земли уклоняются, образуя северо-восточный пассат, а южные массы уклоняются влево, образуя юго-восточный пассат. Таким образом, пассаты своим существованием также демонстрируют вращение Земли.

Сильно влияют на погоду возникающие в атмосфере Земли гигантские вихри — циклоны и антициклоны диаметром несколько десятков тысяч километров. Первые из них представляют области с пониженным в центре атмосферным давлением, вторые — наоборот,

с повышенным. Циклоны зарождаются, когда область пониженного давления возникает на границе двух масс воздуха разной температуры. Завихрение ветров в циклонах происходит из-за отклонения их от направления барического градиента в Северном полушарии вправо, а в Южном — влево. У циклонов минимум давления в его центре. В эту образовавшуюся в атмосфере пропасть разреженной плотности устремляются соседние массы более плотного воздуха, образуя систему ветров, дующих в Северном полушарии против часовой стрелки, если смотреть сверху со стороны спутников, и по часовой стрелке — в Южном. Массы воздушного потока, устремленного к центру циклона, двигались бы прямолинейно, если бы Земля не вращалась; вращение же Земли отклоняет в Северном полушарии все воздушные массы вправо, вследствие чего они и образуют спиральный воздушный вихрь, в котором массы воздуха с большой скоростью перемещаются против часовой стрелки.

В антициклоне из-за повышенного давления воздушные массы устремляются к периферии, загибаясь вследствие вращения Земли вправо; получается вихрь с движением по направлению часовой стрелки.

Эти же явления, служащие демонстрацией вращения Земли, в Южном полушарии происходят в обратном порядке.

ИЗМЕНЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Во всех уголках окружающей нас Вселенной, на любых расстояниях действует общезвестный закон всемирного тяготения, открытый И. Ньютоном в 1687 г., утверждающий, что всякая частица с массой M является центром поля сил, направленных к этой частице, и что напряженность этого поля (т. е. величина силы, рассчитанной на единицу массы в любой точке поля) пропорциональна массе M и обратно пропорциональна квадрату расстояния от нее.

Земля во Вселенной — тоже частица, окруженная силовым полем, которое называется гравитационным полем Земли и простирается, постепенно ослабевая, далеко за пределы орбиты Луны. На всякую материальную частицу, оказавшуюся в области поля тяготения, со стороны Земли действует сила притяжения, и чем ближе частица к Земле, тем эта сила больше. На поверхности на частицы, связанные с Землей, действует еще и центробежная сила, возникающая при вращении Земли.

Таким образом, сила тяжести является равнодействующей двух сил: силы притяжения Земли и центробежной силы, возникающей вследствие ее вращения. Последняя значительно меньше, максимальное значение ее на экваторе Земли составляет всего 1 : 288 часть силы тяжести. Центробежная сила уменьшается от экватора к полюсам

соответственно уменьшению радиуса параллелей, подтверждая этим факт вращения Земли. Как известно, весом тела называют силу, с которой тело действует на покоящейся относительно Земли подвес. Уменьшение веса тела от полюса к экватору можно обнаружить, взвесивая любое тело на точных пружинных весах (весы с гириями не годятся, так как гири тоже изменяют вес). Этот же эффект можно получить с качающимся маятником, который на экваторе качается медленнее. Всякое тело, весящее на полюсе 9,8 Н на экваторе будет весить 9,74 Н.

СПЛЮСНУТОСТЬ ЗЕМЛИ — ВАЖНЕЙШАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЕ ВРАЩЕНИЯ

Одним из факторов, указывающих на вращение Земли, является ее сплюснутость, породившая прецессию, нутацию земной оси и некоторые другие явления. Заметим, что еще Х. Гюйгенс и И. Ньютон теоретически пришли к заключению, что Земля должна быть сплюснута вдоль оси вращения.

Если предположить, что Земля идеально жидкая и на нее не действуют никакие внешние силы, а все частицы ее по закону всемирного тяготения притягиваются друг к другу, то в спокойном состоянии она должна принять форму шара. На каждую каплю жидкости на поверхности шара и внутри его равнодействующая сила притя-

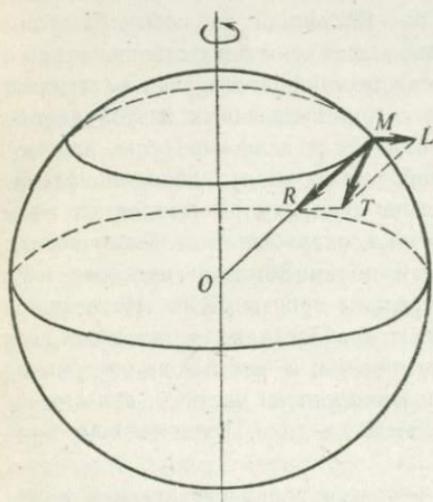


Рис. 17. Сила тяжести MT как равнодействующая сил притяжения MR и центробежной ML

жения от всех других капель будет проходить через центр, и у капли не будет никакой составляющей силы, которая бы принуждала ее двигаться по поверхности; шар будет в равновесии. Точно так же, если пренебречь малыми внешними силами, в равновесии будут, например, мыльные пузыри, дождевые капли, шарики ртути, имеющие также форму шара.

Но если масса вращается, как, например, Земля, то кроме силы притяжения MR (рис. 17), направленной к центру, на нее будет действовать возникающая во всякой вращающейся системе центробежная сила ML , перпендику-

лярная к оси вращения. В результате этого частицы будут удаляться от оси вращения, жидкость будет оттекать от полюса, накапливаться около экватора и примет форму шара, сплюснутого вдоль оси вращения. Жидкость расположится одинаково во все стороны относительно оси вращения, и меридиан будет не кругом, а фигурой, сплюснутой по оси вращения. При равновесии должно выполняться условие: равнодействующая сил притяжения MR и центробежной силы ML направлена на MT . Жидкость будет находиться в покое лишь тогда, когда MT — нормаль к кривой меридиана; тогда проекция равнодействующей на поверхность жидкости равна нулю и нет силы, принуждающей капли жидкости двигаться по ее поверхности. Математический анализ показывает, что в случае однородной жидкости меридиан принимает форму эллипса.

Но Земля не жидкая. Однако, судя по всему, что мы о ней знаем, в процессе ее формирования более плотные вещества собрались около ее центра, более легкие оказались во внешнем слое; вследствие вращения поверхность Земли приняла форму сплюснутого эллипсоида вращения.

ВРЕМЕНА ГОДА — СЛЕДСТВИЕ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Вероятно, в процессе формирования Земли под влиянием внешнего возмущающего ударного импульса, действующего на Землю, ее ось вращения составила с плоскостью орбиты Земли угол $66^{\circ}33'$. В динамике доказывается, что ось уравновешенного твердого тела с тремя степенями свободы, направленная на неподвижную звезду, сохраняет свое направление; это положение полностью относится к движущейся вокруг Солнца Земле, ось которой всегда остается почти параллельной самой себе (поступательное движение). Таким образом, два фактора создают времена года на Земле: параллельное перемещение оси вращения при движении Земли вокруг Солнца и наклон этой оси к плоскости орбиты или эклиптики на угол $66^{\circ}33'$. Когда Земля находится на ближайшем расстоянии от Солнца в перигелии, Северный полюс под действием этих двух факторов отклонен от Солнца, находится в тени (на нем полугодовая ночь). Солнечные лучи в Северном полушарии падают на поверхность под большим наклоном, тепла мало, стоит зима. Через полгода Земля находится в наиболее удаленной от Солнца точке в афелии, Северный полюс наклонен к Солнцу (стоит полугодовой полярный день), в Северном полушарии лучи падают почти отвесно, стоит лето.

Третья причина смены времен года — вращение Земли, благодаря чему сохраняется параллельность оси вращения. Если бы Земля не вращалась вокруг своей оси, то возмущающие силы со стороны Луны и Солнца, действующие на экваториальное утолщение Земли, сов-

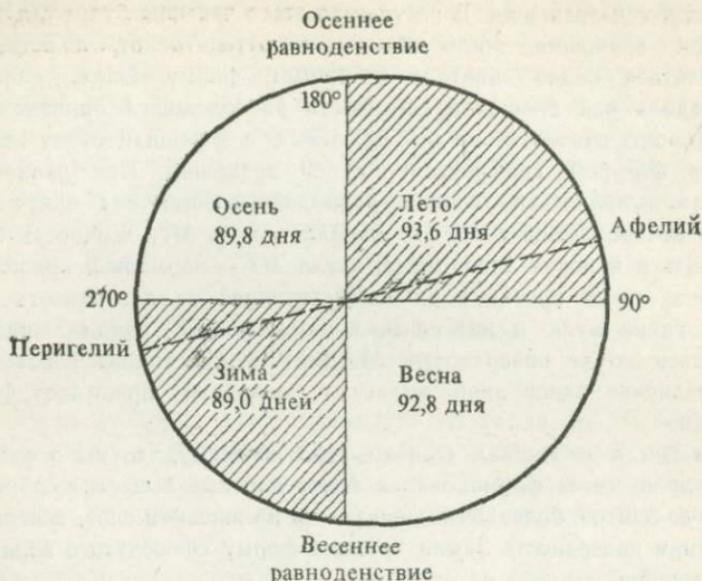


Рис. 18. Продолжительность времен года

местили бы плоскость экватора с плоскостью эклиптики. Тогда не было бы на Земле ни тропиков, ни полярных кругов, ни времен года. Примерно на широте $35-55^\circ$ стояла бы непрерывная весна. Для жителя экватора Солнце всегда восходило бы в точке востока, а заходило в точке запада и ежедневно проходило бы через зенит, и так до конца существования Земли. Гипотетический наблюдатель при равномерном движении его по меридиану от экватора к полюсу обнаружил бы, что Солнце тоже смещается к северу, но вследствие рефракции атмосферы с некоторым замедлением. Когда наблюдатель достигнет полюса, Солнце будет своим нижним краем касаться истинного горизонта и из-за суточного вращения Земли непрерывно двигаться (не с запада на восток — там таких точек нет) по часовой стрелке. На полюсе будет зима и непрерывный день до конца существования Земли.

Вследствие разности расстояний Земли от Солнца изменяется в течение года количество солнечного тепла, полученного Землей, но это изменение настолько незначительно, что маскируется метеорологическими процессами, происходящими на земной поверхности.

Продолжительность времен года неодинакова: весна содержит 92,8, лето — 93,6, осень — 89,8, зима — 89,0 сут. Это объясняется тем, что орбита Земли не круг, а эллипс и линии солнцестояний и равноденствий делят земную эллиптическую орбиту на четыре неравные части (рис. 18), для прохождения которых требуется неодинаковое время.

Начало каждого сезона определяется положением и движением Солнца по небесной сфере. Так, весна по астрономическому счету времени начинается, когда центр видимого диска Солнца пересекает небесный экватор, переходя из Южного полушария небесной сферы в Северное, и находится в точке весеннего равноденствия (21 марта). В это время на всей Земле (кроме самых полярных областей) день равен ночи. Постепенно склонение Солнца начинает расти, оно идет на подъем и 22 июня, когда склонение Солнца достигнет предельного положения ($+23^{\circ}27'$), происходит летнее солнцестояние (период самых длинных дней и коротких ночей), после чего день начинает медленно убывать. Убывание дня продолжается полгода. 23 сентября Солнце проходит через точку осеннего равноденствия, в средних широтах Северного полушария заканчиваются полевые работы, период сбора даров природы — грибов и ягод, идет подготовка к зиме. 22 декабря — зимнее солнцестояние, склонение Солнца — $23^{\circ}27'$ (период самых коротких дней). После зимнего солнцестояния склонение Солнца, оставаясь отрицательным до 21 марта, по величине начинает расти, поэтому в народе говорят: Солнце — на лето, зима — на мороз. Это означает: дни увеличиваются — мороз крепчает.

ДВИЖЕНИЕ ОСИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ В ПРОСТРАНСТВЕ И В ТЕЛЕ САМОЙ ЗЕМЛИ

ПРЕЦЕССИЯ

Неизвестно, вследствие каких процессов, происходящих при формировании Земли, наша планета получила направленную ось и вращение вокруг этой оси. Со времени зарождения астрономии считалось, что ось Земли в пространстве среди звезд, окружающих Солнце, неподвижна. И только за 160 лет до н. э. Гиппарх из Никеи — величайший астроном древности и творец научной астрономии, основанной на наблюдениях, а не на умозрительных заключениях, открыл прецессию.

Он использовал наблюдения звезд александрийских астрономов Аристилла и Тимохариса, сделанные за 150 лет до него. Вычислив из наблюдений предшественников эклиптические координаты звезд и сравнив их со своими наблюдениями, Гиппарх обнаружил, что за 150 лет широты звезд не изменились, а долготы увеличились на 2° . Было совершенно ясно, что сместилась система отсчета по долготе, т. е. точка весеннего равноденствия двигалась навстречу годовому движению Солнца, по подсчетам Гиппарха, на $36''$ в год.

Земля окружена множеством больших и малых небесных тел, расположенных в различных направлениях, взаимодействующих между собой по закону всемирного тяготения. Но существенное влияние на Землю оказывают только силы притяжения со стороны Солнца и Луны. Первые из них удерживают Землю на орбите при движении ее вокруг Солнца, вторые создают ряд возмущений различного порядка; иногда то или иное явление вызывается совместными действиями сил притяжения Солнца и Луны. Напомним, что все силы (кроме сил инерции) вызываются воздействием одних тел на другие.

Под термином *сила* будем подразумевать равнодействующую сил притяжения, приложенных к материальным частицам притягиваемого тела. Сила может сообщить телу только поступательное движение; вращение около оси или точки происходит под действием пары сил. *Парой сил* называется система двух равных параллельных, не лежащих на одной прямой сил, направленных в противоположные стороны. Момент пары сил равен произведению одной из сил пары на плечо; плечо — кратчайшее расстояние между линиями действия сил. Моменты пары — вектор, перпендикулярный плоскости действия пары; он считается положительным, если пара вращает плечо против часовой стрелки.

Прецессия и нутация вызываются Луной и Солнцем, действующими на экваториальное утолщение Земли. Если бы Земля была однородным шаром или шаром, состоящим из концентрических слоев однородной плотности, меняющейся от слоя к слою, то ее ось вращения всегда сохраняла бы в пространстве неизменное направление. Прецессии и нутации не было бы и в том случае, если бы Луна и Солнце всегда находились в плоскости экватора Земли. Тогда сила притяжения Луны проходила бы через центр Земли, возмущая только ее поступательное движение. В действительности, как мы уже видели, Земля — сложное сплюснутое тело, имеющее утолщение вдоль экватора. Силы притяжения Луны или Солнца действуют на более близкую к ним часть экваториального утолщения сильнее, чем на более далекую. (По закону всемирного тяготения сила взаимодействия между притягивающимися телами прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, если расстояние между телами велико по сравнению с их линейными размерами.)

Во всех (кроме оговоренных) случаях Луна и Солнце, притягивая экваториальное утолщение Земли, создает две пары сил. Каждая из этих пар лежит в плоскости того меридиана Земли, где в данный момент светило находится в кульминации. Момент каждой из пар лежит в плоскости экватора Земли.

Изобразим Землю так, чтобы плоскость экватора Земли совпадала с плоскостью небесного экватора. Рассмотрим действие силы притя-

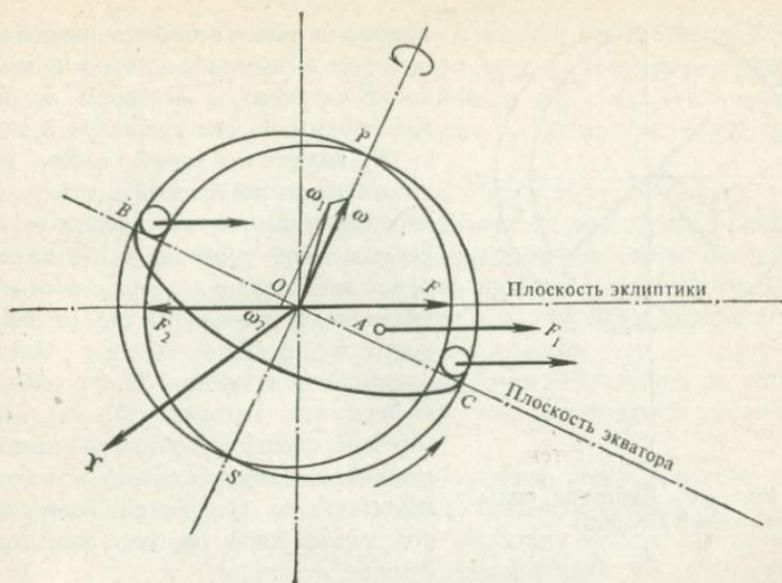


Рис. 19. Действие силы притяжения Солнца на Землю, когда Солнце находится в точке летнего солнцестояния

жения Солнца на Землю в момент летнего солнцестояния, когда ось Земли и прямая, соединяющая Землю и Солнце, лежат в плоскости, перпендикулярной к плоскости эклиптики. Вследствие того что сила, действующая со стороны Солнца на более близкую к нему часть экваториального утолщения Земли, больше, чем сила, действующая на более далекую часть, их равнодействующая проходит не через центр Земли O , а через более близкую к Солнцу точку A (рис. 19). Если приложить к центру Земли две равные силы F и F_2 , направленные одна к Солнцу, другая от Солнца, то сила F будет только удерживать Землю на ее орбите и никакого вращения не вызовет. Вращательное движение будет вызвано парой сил F_1 и F_2 , которая будет поворачивать плоскость экватора вокруг прямой пересечения плоскостей экватора и эклиптики, стремясь совместить ее с плоскостью эклиптики. Угловая скорость вращения (вектор ω_2) будет направлена по оси OP в сторону точки весеннего равноденствия. Действие пары сил (F_1, F_2), заключающееся в смещении оси вращения Земли в одном направлении, в конечном итоге привело бы к тому, что плоскость экватора совместилась бы с плоскостью эклиптики, если бы Земля не вращалась вокруг своей оси OP с угловой скоростью ω , направленной по этой оси.

Как известно, угловые скорости складываются по правилу сложения векторов. В нашем случае при сложении вектора ω_2 , направ-

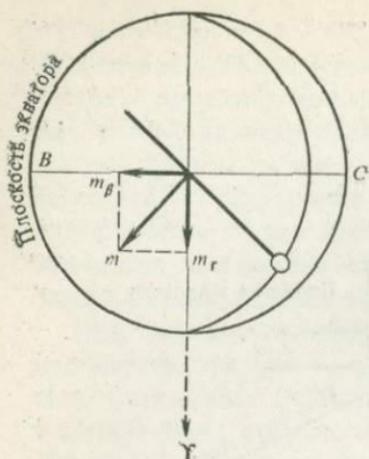


Рис 20. Действие силы притяжения Солнца

ленного в точку весеннего равноденствия (т. е. перпендикулярно к плоскости чертежа), с вектором ω , направленным по оси вращения в точку P , получится новый вектор ω_1 , представляющий собой диагональ параллелограмма, построенного на первых двух векторах. Вектор ω_1 будет лежать уже не в плоскости меридиана действия пары сил (в плоскости чертежа), а над ней. Иначе говоря, ось вращения Земли выйдет из плоскости чертежа, став над ней. Она сместится относительно неподвижной оси, направленной в полюс эклиптики по конической поверхности с вершиной конуса в центре Земли.

Ну а какая картина будет наблюдаться не в моменты равноденствий и солнцестояний, а, например, при долготе Солнца в 45° ? Для этой долготы момент m пары сил, лежащий в плоскости меридиана Земли, перпендикулярный этой плоскости, можно разложить по правилу параллелограмма на два момента: m_γ и m_β . Один из них будет направлен в точку весеннего равноденствия (рис. 20), и соответствующая этому моменту пара будет лежать в плоскости колюра солнцестояний (круга склонений, проходящего через полюсы мира и точки летнего и зимнего солнцестояний), другой будет лежать под прямым углом к m_γ в сторону от Солнца, а соответствующая ему пара сил расположится в плоскости колюра равноденствий (круга склонений, проходящего через полюсы мира и точки осеннего и весеннего равноденствий). Эта пара повернет ось вращения Земли к точке осеннего равноденствия.

При долготе Солнца 135° момент первой пары сил m_γ будет влиять на Землю так же, как и при долготе 45° . Вторая пара с моментом m_β произведет обратное действие (чем при долготе 45°), т. е. повернет ось вращения Земли к точке весеннего равноденствия.

Таким образом, при любом положении Солнца на эклиптике создаваемую им пару сил можно разложить на две пары, причем одна из них, лежащая в плоскости солнцестояний, всегда будет поворачивать Землю около прямой, направленной в точку весеннего равноденствия, против часовой стрелки. Другая пара, лежащая в плоскости равноденствий, меняет свое направление вращения в зависимо-

сти от положения Солнца на эклиптике, смещая ось вращения Земли периодически то в сторону осеннего, то в сторону весеннего равноденствий. Нетрудно сообразить, что величина пары сил, создаваемая Солнцем, зависит от положения Солнца на эклиптике, иначе говоря — от его долготы и склонения.

Масса Луны примерно в 27 млн. раз меньше массы Солнца, зато Луна в 374 раза ближе к Земле и влияет на нее сильнее Солнца, создавая другую пару сил, которая стремится совместить плоскость земного экватора с плоскостью лунной орбиты. Но движение Луны значительно сложнее движения Солнца, так как Луна смещается по орбите, наклоненной на $5^{\circ}9'$ к эклиптике и, кроме того, возмущается Солнцем и в большей степени Землей. Точки пересечения эклиптики и орбиты Луны (узлы) смещаются в сторону, обратную движению Луны с периодом около 18,6 года.

Так как пара сил, создаваемая притяжением Луны, действует аналогично паре (F_1 , F_2), создаваемой притяжением Солнца, ее можно разложить на две пары: лежащую в плоскости колюра солнцестояний и лежащую в плоскости колюра равноденствий. Поэтому в каждый момент времени в плоскости колюра солнцестояний будут действовать две возмущающие пары сил — от Солнца и Луны. Они действуют против часовой стрелки, вращая Землю около оси, направленной в точку весеннего равноденствия.

Это вращение, складываясь с собственным суточным вращением Земли, создает новый вектор угловой скорости и, следовательно, новую ось вращения, которая сместится к точке весеннего равноденствия.

Вследствие непрерывного суммарного действия двух пар осей вращения Земли станет медленно смещаться около неподвижной оси, направленной в полюс эклиптики, которая является образующей конической поверхностью с вершиной конуса в центре Земли. Если эту картину перенести на небесную сферу, то Северный полюс мира будет двигаться вокруг полюса эклиптики, который можно считать неподвижным среди звезд.

Это движение происходит по малому кругу со сферическим радиусом $23^{\circ}27'$ приблизительно с постоянной скоростью $20''$ в год. Так как вектор смещения полюса направлен в точку весеннего равноденствия, то последняя непрерывно отступает (смещается) по эклиптике навстречу кажущемуся годичному движению Солнца со скоростью $20''/\sin 23^{\circ}27' = 50,371''$ в год. Это движение точки весеннего равноденствия по эклиптике навстречу кажущемуся годичному движению Солнца называется *лунно-солнечной прецессией* (предварение равноденствий).

НУТАЦИЯ

В плоскости колюра равноденствий также образуются две пары сил — от Луны и Солнца. Они не действуют все время в одном направлении, а меняют направления вращения в зависимости от положения Солнца на эклиптике и Луны на ее орбите. Поэтому в плоскости колюра равноденствий возникает не прогрессивное движение оси вращения Земли, а колебательно-периодическое с различными периодами. Так, например, движение Солнца по эклиптике вызовет годичный и полугодичный периоды в колебании земной оси, движение Луны — период 18,6 года, соответствующий движению лунных узлов по эклиптике с месячным и более мелкими колебаниями. Совокупное действие Солнца и Луны на сплюснутую Землю смещает полюс мира вокруг полюса эклиптики по сложной кривой. Методически это сложное движение раскладывается на два более простых: вековое — прецессионное и периодическое — нутационное.

Период векового движения полюса равен $360 \cdot 60 \cdot 60'' : 50,371'' = 25\,729$ годам (число секунд в окружности ($1\,296\,000''$), на годичный путь точки весеннего равноденствия по эклиптике). На это вековое движение накладываются колебания с периодами, равными перемещению Солнца по эклиптике (тропический год), половине года, перемещению лунных узлов по эклиптике (18,6 года), половине лунного месяца (13,7 сут), и другими более мелкими.

Полюс мира, обладающий только вековым — прецессионным — движением, называется *средним полюсом мира* P_0 .

Небесный экватор, соответствующий среднему полюсу мира, будет *средним небесным экватором* в данный момент. Точка весеннего равноденствия, соответствующая положению среднего экватора, является *средней точкой весеннего равноденствия* в этот момент.

Полюс мира, обладающий не только вековым (прецессионным), но и периодическим (нутационным) движением, называется *истинным полюсом мира* P . Небесный экватор и точка весеннего равноденствия, соответствующие положению истинного полюса мира в заданный момент, будут *истинным экватором* и *истинной точкой весеннего равноденствия* в этот момент.

В нутационном относительном движении истинный полюс мира движется около среднего по сложной кривой эллиптического вида, направление большой оси которой проходит через полюс эклиптики. Вследствие векового движения среднего полюса мира средняя точка весеннего равноденствия Υ_0 прогрессивным движением с почти постоянной скоростью смещается по эклиптике навстречу годичному движению Солнца. В результате периодического движения истинного полюса мира истинная точка весеннего равноденствия Υ колеблется около средней с различными периодами, главнейший из которых 18,6 года.

Силы, действующие на Землю и Луну со стороны планет, возмущают движение центра масс системы Земля—Луна и смещают плоскость эклиптики и ее полюс. Вследствие этого северный полюс эклиптики Π движется со скоростью $0,47''$ в год по дуге большого круга под углом 7° к прямой PR , проведенной через полюс мира и полюс эклиптики. Из-за смещения эклиптики смещается по эклиптике и точка весеннего равноденствия по направлению движения Солнца. Это смещение Υ называется *прецессией от планет*, величина ее равна $0,13''$ в год.

Лунно-солнечная прецессия, складываясь с прецессией от планет, дает полную прецессию средней точки весеннего равноденствия Υ . Лунно-солнечная прецессия и колебания плоскости эклиптики вызывают периодические отклонения истинной точки весеннего равноденствия от средней. Истинная точка весны совершает относительно средней небольшие колебания как вдоль эклиптики, так и вдоль экватора. Амплитуда колебаний истинной точки весеннего равноденствия относительно средней по эклиптике составляет $\pm 18''$, по экватору — примерно $\pm 16''$. Амплитуда колебаний наклона эклиптики к экватору $\Delta\epsilon$ составляет $\pm 10''$.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРЕЦЕССИИ И СОБСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Прецессию и собственное вращение Земли можно интерпретировать следующим образом. Представим себе узкий круговой конус с вершиной в центре Земли, симметричный относительно оси инерции и прочно связанный с Землей (рис. 21). Представим далее большой круговой конус с вершиной в центре Земли. Центральная ось конуса совпадает с осью эклиптики, но он не вращается относительно эклиптики. При вращении Земли первый конус без скольжения катится по второму; жестко связанная с ним Земля вращается и прецессирует одновременно.

Мгновенной осью вращения всегда является линия касания или общая образующая конусов. Так как Земля вращается вместе с малым конусом, в теле планеты ее мгновенная ось вращения каждые сутки обходит по круговому основанию малого конуса вокруг оси инерции. Следовательно, полюс вращения P перемещается по поверхности Земли. Это происходит тогда, когда начальное равномерное вращение около оси инерции нарушается внешней силой, в результате чего ось вращения отклоняется от оси инерции. В данном случае и появляется накладывающееся на эйлеровское дополнительное движение оси вращения, вызванное возмущающими силами со стороны Луны и Солнца. Перемещение полюса составляет сотые доли секунды дуги, но его нельзя не принимать во внимание, когда дается

движения Земли. Нутация вызывает покачивание оси инерции и мгновенной оси вращения относительно эклиптики, из-за чего оси в своем движении вокруг оси эклиптики непрерывно периодически отклоняются от конических поверхностей. В связи с движением в пространстве оси инерции OC перемещается среди звезд и небесный экватор. За счет этого движения, а также за счет движения эклиптики, о котором шла речь, происходит смещение истинной точки весеннего равноденствия вдоль эклиптики, которое можно разделить на регулярное (лунно-солнечная прецессия) и периодическое (нутация).

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ ПО АСТРОНОМИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ

При всех преобразованиях координат, связанных с определением положения небесных тел, долгое время допускалась гипотеза, которой ось вращения земного сфероида считалась неподвижной внутри Земли. В конце XVIII в. Л. Эйлер указал на возможность изменения положения оси вращения внутри сфероида с течением времени.

Считая Землю абсолютно твердым однородным телом (о внутреннем строении Земли в то время ничего не знали) и допуская, что на нее не действуют никакие внешние силы, Эйлер показал, что мгновенная ось вращения может описывать конус около наименьшей главной оси инерции земного сфероида с периодом

$$T = 2\pi \frac{C - A}{A} r,$$

где r — составляющая угловой скорости ω около полярной оси, A и C — главные моменты инерции земного эллипсоида ($A < C$).

Выражая скорость мгновенной оси вращения Земли относительно наименьшей главной оси эллипсоида инерции в оборотах в звездные сутки и принимая $r = 2\pi$, получим

$$T = A / (C - A).$$

Это период Эйлера, равный 305 звездным суткам; а величина $(C - A) / A = H$ — сжатие земного сфероида.

Из решения уравнений вращения Эйлер получил только период вращения, а угол между мгновенной осью и главной наименьшей осью инерции в предположении эйлеровского периода нужно было определить из астрономических наблюдений. К сожалению, в течение более 50 лет после выхода в свет работы Эйлера (1790 г.) по рассматриваемому вопросу нигде ничего не было сделано. Лишь после введения в строй Пулковской обсерватории (1839 г.) с ее превосходными наблюдательными инструментами начались наблюдения Полярной звезды на большом вертикальном круге Эртеля, из которых впоследствии (1872—1875 гг.) и была получена величина угла между осью вращения и главной наименьшей осью инерции Земли, равная $0,081'' \pm 0,014''$.

В истории науки бывают разные периоды. Иногда вперед уходит теория, иногда — практика. В XIX в. вступили в строй новые обсерватории, на которых начались наблюдения. К концу этого века было завершено много длительных первоклассных рядов наблюдений. Американским астрономом Сэтом Чандлером были обработаны 45 рядов, включающих 33 тыс. наблюдений, выполненных в 1837—1891 гг. с целью получения периода движения полюса (о чем мы расскажем дальше).

Чандлер получил период движения полюса вращения Земли вокруг полюса инерции, равный 428 сут. (Свою работу он опубликовал в 1892 г.) Этот 14-месячный период по праву получил название *периода Чандлера* или *свободной нутации*. Разницу между периодами Эйлера и Чандлера, которая в то время интересовала многих ученых, разъяснил американский астроном С. Ньюком. Он показал, что период Эйлера есть тот же период Чандлера, полученный при допущении, что Земля абсолютно твердое тело, тогда как период Чандлера получен для реальной Земли, которая обладает некоторой упругостью, удлиняющей период.

Период свободной нутации и вопрос о структуре внутреннего строения Земли, приводившей к этому результату, заинтересовала многих ученых. Появились теоретические исследования французов Ф. Тиссерана, А. Пуанкаре и др., получили распространение предположения, что Земля не абсолютно тверда и что как на поверхности земного сфероида, так и внутри его происходят перемещения масс. Вследствие этого изменяются как величины главных моментов инерции сфероида, так и направления главных осей. В такой постановке задача решалась Дарвином, Гюльденом, Скиапарелли и др. Все они пришли к единому мнению, что медленно совершающиеся геологические процессы как на поверхности Земли, так и внутри ее вызывают двоякое движение полюса — вековое и периодическое.

Возникли предположения, что Земля имеет внутри полость, которая наполнена жидким веществом.

В середине XVIII столетия была общепринята космогоническая гипотеза происхождения Земли Канта—Лапласа, с точки зрения которой Земля на определенной стадии своего исторического развития состояла из жидкой массы с плотностью, возрастающей к ее центру. Впоследствии оболочка Земли стала постепенно затвердевать, а ее внутренние части продолжали оставаться в жидком состоянии. Поэтому, когда была предложена модель Земли с жидким ядром и поставлена задача о влиянии жидкого ядра на вращательное движение Земли, это не стало сенсацией. Впервые решением этой задачи занялся американский ученый Л. Госкинс, но полученные им результаты, изложенные в ряде статей, неубедительны и для нас имеют только историческое значение. Первые капитальные работы

принадлежат английскому физику В. Томсону, который наряду с другими моделями рассмотрел модель Земли с жидким ядром. Он пришел к выводу, что влияние жидкого ядра на вращение Земли должно значительно увеличивать амплитуду полугодовой и особенно полумесячной нутации. Этот вывод, опубликованный В. Томсоном без доказательств, был подтвержден позднейшими исследованиями.

Задача о вращении Земли, состоящей из абсолютно твердой оболочки и жидкого ядра, рассматривалась итальянским математиком В. Вольтеррой, который в нескольких статьях и мемуарах рассмотрел влияние на перемещение полюсов таких движений, при которых не происходит изменений в распределении масс. Он характеризовал эти движения только их главным моментом количества движения и показал, что, зная его, мы можем определить угловую скорость Земли, а следовательно, ось вращения и положение полюсов Земли и, наоборот, зная угловую скорость, мы можем найти главный момент количества движения.

Вопрос о жидком ядре Земли возник не случайно. Абсолютно твердое тело и тело, имеющее внутри жидкость, при одинаковых форме и массе вращаются совершенно по-разному: твердое — быстро, наполненное жидким веществом — медленно. По вращению Земли, по движению ее оси вращения в теле самой Земли можно судить о состоянии вещества в ее глубоких слоях.

Идея эта не новая и не выдуманная. Почти столетие тому назад, а именно в 1885 г., профессор Московского университета Н. Е. Жуковский (по характеристике В. И. Ленина — отец русской авиации) выполнил и опубликовал работу «О движении твердого тела, имеющего полости, наполненные однородной капельной жидкостью».

В этой работе он публикует одну из важнейших своих теорем механики сложного тела, заключающуюся в том, что «Если в теле имеется какая-нибудь полость, наполненная трущейся жидкостью, и такой системе сообщаем какие-нибудь начальные скорости, то движение будет стремиться к предельному состоянию, при котором одну из главных осей инерции рассматриваемых масс займет направление главного момента начальных количеств движения и вся система будет вращаться около нее, как одно неизменяемое тело, с постоянной угловой скоростью, получаемой от разделения главного момента начальных количеств движения на момент инерции системы относительно этой оси». Эта теорема сформулирована применительно к Земле; последняя рассматривается как некоторое твердое тело, связанное с материальной системой (жидкостью), движущейся относительно этого твердого тела. Центр тяжести твердого тела и центр тяжести материальной системы (жидкое ядро) совпадают с центром тяжести земного сфероида.

Позднее, опираясь на работу Н. Е. Жуковского, задачу о вращении Земли, состоящей из абсолютно твердой оболочки и жидкого ядра, выполнил и опубликовал профессор Московского университета Ф. А. Слудский. Он задался целью объяснить изменения широт, основываясь на предположении, что земной сфероид имеет полость, заполненную однородной несжимаемой жидкостью. В своих исследованиях он принял, что положение центра инерции системы постоянно и что главные оси инерции всей системы не изменяются ни по величине, ни по направлению. Из дифференциальных уравнений движения автор вычисляет проекции главного момента количества движения на главные оси инерции для внутреннего стационарного движения жидкости. Чтобы вычислить эти величины, необходимо знать законы движения жидкости в полости. Для определения этого движения Ф. А. Слудский использует общие уравнения гидродинамики, причем полагает, что силы, действующие на жидкие частицы; имеют потенциал; затем он переходит к более сложному случаю, когда жидкость внутри Земли находится в вихревом движении, при котором нет потенциала скоростей.

Разработав и применив свою теорию к земному сфероиду, т. е. к случаю, когда $A=B$ и $C>A$ и жидкое ядро имеет форму эллипсоида, Ф. А. Слудский находит, что вращательное движение ядра земного сфероида почти равномерное и происходит вокруг переменной оси, очень мало отклоненной от наименьшей главной оси инерции.

Принимая во внимание вязкость жидкости и ее трение о стенки внутренней полости, автор находит величины p и q (проекции угловой скорости ω твердого тела на оси координат x, y), которые и определяют движение полюса по поверхности земного сфероида. Оказывается, при принятии гипотезы жидкого ядра внутри Земли движение земных полюсов вращения должно состоять из двух периодических движений. По оценке автора, первый период приблизительно равен суткам, т. е. 24 звездным часам, второй же в сред-

них сутках равен $[(C-A)/(A-\frac{2}{5}ma)^2]^{\frac{1}{2}}$, где A, C — главные моменты инерции эллипсоида инерции, причем C — наибольший; $\frac{2}{5}ma^2$ — момент инерции эллипсоида, m — масса внутреннего ядра, a — его радиус. Не вычисляя этого периода, Ф. А. Слудский полагает, что он может быть равен 12 или 14 месяцам. Амплитуда нутации определяется им только из наблюдений. Ф. А. Слудский поступает очень осторожно и не доводит задачу до числового результата, утверждая, что период свободной нутации может быть любым. Заметим, что это было еще до опубликования работы Чандлера в 1889 г. В дальнейшем этим вопросом занимались А. А. Иванов, А. Пуанкаре, А. С. Лейбензон и др.

Около двух десятков лет назад проблема изучения внутреннего строения Земли астрономическими методами вступила в новую фазу. Дело в том, что ось вращения Земли под действием возмущающих (приливообразующих) сил со стороны Луны и Солнца движется в пространстве (относительно оси и полюса эклиптики) сложным образом. Это движение методически разделяется на два движения: медленное вековое (прецессия) и периодическое (нута́ция). В нашей работе мы коснемся только периодического — нута́ции, так как прецессия нас в данном случае не интересует. Нутационное движение оси вращения Земли очень сложное и зависит от процессов, протекающих внутри Земли и на ее поверхности, а также от взаимных положений Земли, Луны и Солнца. Вследствие этого ось вращения Земли совершает не одно, а ряд колебательных движений с разными периодами (налагающихся одно на другое). Наименьший период около 10 сут, а наибольший — 18,6 года; этот наибольший период — главный член нута́ции в наклонности (изменение наклона эклиптики к экватору) называется *постоянной нута́ции* и обозначается буквой N . Численное значение постоянной нута́ции N , входящей в систему астрономических постоянных, можно найти из теоретических соотношений, связывающих N с другими постоянными, или из результатов астрономических наблюдений.

Значение $N=9,21''$, введенное в систему астрономических постоянных еще в 1896 г., до 50-х годов нашего столетия считалось более или менее удовлетворительным. Но в связи с успехами космических исследований и повышением точности определения параметров Земли, что необходимо для космонавтики, а также с достижениями в других разделах астрономии понадобилось повысить точность постоянной нута́ции N и коэффициентов, входящих в формулы нутационных разложений нута́ции в долготе (смещение истинной точки весеннего равноденствия относительно средней) и наклонности. Заметим, что если известно значение постоянной нута́ции N , вычисленное на основании теории вращения абсолютно твердой Земли, то можно вычислить значения всех членов ее разложения.

На рубеже XX столетия в трудах ряда ученых — В. Томсона, С. Хога, Г. Хилла, Ф. А. Слудского, А. Пуанкаре — было показано, что нута́ция реальной Земли, строение которой мы изучаем, может существенно отличаться от нута́ции Ньюкома, полученной в предположении абсолютно твердой Земли, за счет влияния жидкого ядра. Но численных значений, подтверждающих этот факт, не было, так как не было данных о внутреннем строении Земли. И только к середине XX в., точнее в 50-х годах, Н. Джеффрис, а позднее он же совместно с К. Висенте показал, что учет упругости оболочки Земли и влияния ее жидкого ядра при построении теории нута́ции могут несколько сузить разрыв между теоретически вычисленным и выве-

денным из наблюдений значениями нутационных коэффициентов. В пределе этот разрыв необходимо свести к нулю, для чего нужно, с одной стороны, улучшать наблюдаемые значения нутационных коэффициентов, с другой — подбирать лучшую, соответствующую действительности модель Земли.

Работы в этом направлении как в СССР, так и за рубежом начались в 60-х годах нашего столетия. В Советском Союзе многое сделали академик Е. П. Федоров и член-корреспондент М. С. Молоденский. Первый из них обработал большие ряды наблюдений Международной службы широты, второй — разработал единую теорию нутации и земных приливов. В последней работе принял участие Н. А. Попов, который из наблюдений определил амплитуду нутации земной оси с почти суточным периодом, значение которой было теоретически предсказано М. А. Молоденским. Существование такой нутации (с периодом около 23 ч 56 мин 53 с звездного времени) и подтверждает гипотезу о жидком ядре Земли.

Общими усилиями советские и зарубежные ученые пришли к хорошим результатам. В настоящее время окончательно установлено, что расхождения между значениями коэффициентов нутации, вычисленными для абсолютно твердой Земли и выведенными из наблюдений, можно уменьшить до $0,02''$.

Учеными создано несколько моделей Земли. Во всех моделях принято, что оболочка Земли (кора и мантия) твердая и упругая. Различаются все модели по структуре внешнего жидкого ядра и субъядра. Вот некоторые из моделей Земли.

Модель Эйлера — Земля абсолютно твердая.

Модель Пуанкаре — твердая оболочка и твердое несжимаемое ядро.

I модель Джеффриса — Висенте — однородное жидкое ядро с дополнительной массой в центре.

II модель Джеффриса — Висенте — упругая оболочка, жидкое ядро с плотностью, меняющейся по закону Роша: $\rho = \rho_0(1 - ar^2)$, где ρ_0 — плотность в центре Земли, r — расстояние от центра Земли, a — постоянный коэффициент.

I модель Молоденского — упругая оболочка, жидкое ядро, плотность которого зависит только от изменения давления с расстоянием от центра масс.

II модель Молоденского — в I модель вводится центральное однородное несжимаемое ядро плотностью $23,5 \text{ г/см}^3$. Плотность на границе оболочки и жидкого ядра $8,9 \text{ г/см}^3$. Модель Гильберта — Дзивонского (G—D 1066 A). Плотность в оболочке изменяется без скачков; плотность в ядре на его границе с оболочкой $9,914 \text{ г/см}^3$. Максимальное значение плотности во внутреннем ядре $13,421 \text{ г/см}^3$.

Заметим, что как в модели MII, так и в модели G—D 1066A

в плотности существуют два скачка: на 0,2 радиуса Земли от центра и на 0,55.

В этих двух моделях учтено влияние на нутацию упругости мантии и жидкого ядра Земли. Сравнение теории нутации с наблюдениями подтверждает правильность этого учета, так как расхождение наблюдаемых и теоретически предвычисленных значений коэффициентов нутации не превышает $\pm 0,002''$.

Имеется серия других различных вариантов модели Земли, но ни одна из существующих моделей согласованных результатов не дает. Поэтому в связи с совершенствованием техники геофизических и астрономических наблюдений и появлением мощных ЭВМ признано целесообразным создавать стандартную модель Земли, которая должна по возможности точно описывать распределение различных физических свойств в земных недрах и удовлетворять средним значениям радиуса, массы и момента инерции Земли. Работа в этом направлении ведется и предположительно будет закончена в конце 80-х годов.

ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОЛОГИИ

Изучение Земли в широком масштабе представляет собой глобальную проблему современности, в которой в той или иной степени принимают участие ученые, изучающие сейсмологию, геологию, геофизику и гравиметрию.

Верхний слой Земли изучается непосредственно с помощью бурения (самая глубокая скважина проникает в глубь Земли лишь на 11,5 км). Для исследования более глубоких слоев применяются косвенные методы и главнейший из них принадлежит сейсмологии — разделу геофизики, занимающемуся изучением землетрясений и связанных с ними явлений. С помощью соответствующей современной аппаратуры (различных сейсмографов и др.) изучаются пути и скорости упругих колебаний — сейсмических волн в различных слоях Земли от ее поверхности до самых глубоких недр.

Основная задача сейсмологии — выяснение причин землетрясений, связи их с тектоническими процессами внутри Земли, изучение ее внутреннего строения в целом.

Большую помощь в изучении Земли оказывает гравиметрия. Она дает материал для суждения о строении земной коры, для разведки полезных ископаемых, изучения фигуры Земли и т. д. Однако все сведения о строении, составе и свойствах «твердой» Земли преимущественно предположительные, так как их получают только с помощью косвенных методов исследования, главным образом геофизических.

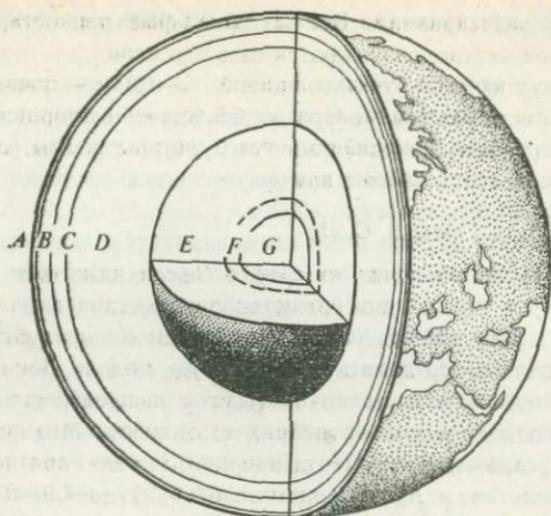


Рис. 22. Внутреннее строение Земли по сейсмическим данным

Основываясь на результатах исследования скоростей сейсмических волн, внутреннюю часть Земли делят на следующие зоны от поверхности до центра (рис. 22): *A* — земная кора, *B* — верхняя мантия, *C* — переходная зона, *D* — нижняя мантия, *E* — внешнее ядро, *F* — переходная зона и *G* — внутреннее ядро. Вещество мантии (зоны *B*, *C* и *D*) находится в твердом состоянии, внешнее ядро (зона *E*) — в жидком.

Границы между зонами *A* и *B*, *D* и *E*, *F* и *G* — резкие; между зонами *B* и *C*, *C* и *D*, *E* и *F* — условные, так как здесь переход постепенный.

Земная кора (зона *A*)

Земная кора — верхняя оболочка «твердой» Земли толщиной от 15 до 70 км. Она образовалась в далекие геологические эпохи, выделившись из мантии. Процесс дифференциации мантии продолжается и сейчас; есть предположение, что земное ядро разрастается за счет мантии и в современную эпоху. Подстилающая эту зону поверхность Мохоровичича, являющаяся разделом между земной корой и мантией Земли, простирается под поверхностью всего земного шара, но в разных по геологическому строению областях залегает на разных глубинах. Земная кора имеет слоистое строение, различное в разных местах. Самый верхний слой — осадочный — состоит из осадочных пород. Сверху он ограничен атмосферой и гидросферой, снизу — кристаллическими породами.

Особое значение для человечества имеет материковая верхняя часть земной коры толщиной от 0 до 20 км, доступная для непосред-

редственного исследования. Все материальные ценности, которыми обладает человечество, извлекаются из этого слоя.

Самый верхний слой коры толщиной 1—1,5 м — почва; она несет на себе растительный покров и обладает плодородием, на ней воспроизводятся сельскохозяйственные культуры, цветы, травы и все многообразие растительного мира.

Мантия Земли (зоны *B, C, D*)

Мантия Земли, оболочка «твердой» Земли включает в себя три зоны: *B* — верхнюю мантию, граничащую с земной корой и, по вычислениям Г. Джеффриса (1939 г.), лежащую на глубине 413 км, *C* — переходную зону, лежащую между верхней и нижней мантиями, и *D* — нижнюю мантию, граничащую с внешним ядром. От земной коры верхнюю мантию отделяет поверхность Мохоровичича, на которой скорость продольных сейсмических волн при переходе из коры в мантию возрастает скачком с 6,7—7,6 до 7,9—9,2 км/с. На границе нижней мантии и внешнего ядра на глубине 2900 км от поверхности Земли скорость продольных волн падает с 13,6 до 8,1 км/с. В нижней части верхней мантии в зоне *B*, расположенной непосредственно под границей Мохоровичича, скорости продольных волн растут. Однако на глубине 100—120 км под континентами и 50—60 км под океанами рост скоростей продольных волн сменяется слабым их уменьшением. В нижней части верхней мантии, в слое Б. Гутенберга, скорость распространения сейсмических волн несколько меньше, чем в слоях, лежащих выше и ниже этого слоя. На глубине около 250 км под континентами и 400 км под океанами скорости продольных волн снова начинают расти. Таким образом, в слое *B* имеется область (слой) пониженных скоростей, в которой находятся очаги вулканов, что доказано по наблюдениям прохождения поперечных волн.

Слой *C* и *D* характеризуются резким возрастанием скоростей как продольных, так и поперечных волн. Вычисления показывают, что на глубине 410 км скорости продольных волн равны 8,97 и поперечных 4,96 км/с, на глубине 1000 км — соответственно 11,42 и 6,13 км/с и на глубине 2898 км — 13,64 и 7,30 км/с. Вещество во всех трех слоях *B, C* и *D* находится в твердом, по-видимому, кристаллическом состоянии. Жесткость вещества мантии, обнаруживающаяся при наблюдении приливных деформаций, всецело обусловлена влиянием зон *C* и *D*. Эти зоны составляют 66 % от всего объема Земли. Вся мантия по объему занимает 83 %, а по массе — 67 %.

Внешнее ядро и переходная зона (зоны *E* и *F*)

Зона *E* — внешнее ядро — простирается с глубины 2900 км до глубины 4980 км. Верхняя граница этого слоя выражена очень чет-

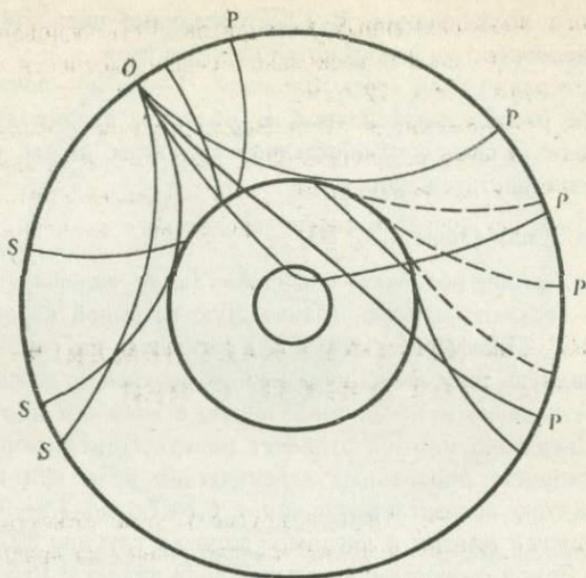


Рис. 23. Внешнее ядро не пропускает поперечных волн S и уменьшает скорости продольных волн P

ко; на ней скорость продольных волн падает от 13,25 до 8,1 км/с, а далее внутри ядра скорость опять возрастает скачком до 11,2 км/с. Радиус внешнего ядра 3470 км, объем всего ядра от общего объема Земли составляет всего 16 %.

Внешнее ядро имеет специфические особенности: оно не пропускает поперечных сейсмических волн S (рис. 23) и уменьшает скорости продольных волн P . В обычных условиях таким свойством обладает жидкая среда. В связи с этим принято считать, что во внешнем ядре вещество находится в жидком состоянии. Вследствие вращения Земли жидкое ядро сжимается, его экваториальная ось становится больше полярной на величину около 12 км.

Переходный слой — зона F толщиной почти 200 км, лежит ниже поверхности Земли на 5000 км.

Внутреннее ядро (зона G)

Глубже переходной зоны F лежит зона G — внутреннее ядро. Радиус этой зоны, так называемого субъядра, около 1,3 тыс. км. На границе субъядра скорость продольных волн 11,2 км/с, а внутри субъядра она остается постоянной. По оценкам различных ученых, плотность вещества в центре Земли принимает разные значения, вплоть до 23,5 г/см³. При этом не учитывается важное обстоятельство, что вещество субъядра не испытывало гравитационной дифференциации и представлено смесью железистых и силикатных соеди-

нений вроде железоканменных метеоритов. Есть основания считать, что плотность субъядра G несколько меньше плотности нижней части внешнего ядра E , т. е. 12 г/см^3 .

По мере продвижения в глубь Земли плотность вещества постоянно растет, достигая на глубине 2900 км $5,7 \text{ г/см}^3$, и здесь мгновенно делает скачок до величины $9,7 \text{ г/см}^3$, а далее опять постепенно растет до центра, достигая своего предельного значения — 12 г/см^3 .

ОБО ВСЕМ, ЧТО ОКРУЖАЕТ ЗЕМЛЮ И ВРАЩАЕТСЯ ВМЕСТЕ С НЕЙ

ГИДРОСФЕРА

Океаны, моря, реки, озера и другие водные объекты Земли составляют ее гидросферу, которая заметно влияет на вращение Земли.

Самый верхний твердый слой Земли — ее кора, или, как его называли в прошлом, литосфера, имеет замкнутую сложную овальную форму, близкую к эллипсоиду вращения, но не является правильной геометрической фигурой. Земная кора очень неровная, на ней есть широкие впадины, вспученные поля — возвышенности и другие более сложные образования.

Вот как представлял себе происхождение гидросферы американский ученый У. Максвелл Рид: «Земная кора очень плохо проводит тепло. Точно глухая каменная стена она отгородила глубины Земли от воздуха. В глубинах Земли еще стоял страшный жар, там остывание шло очень медленно. А выше, над земной корой воздух, полный водяными парами, остывал гораздо быстрее. Настал день, когда воздух остыл уже настолько, что пар начал превращаться в бесчисленные капельки воды. Чудовищные ливни хлынули с неба на Землю.

В первый раз за все время на Земле появилась вода. Вода заполнила широкие впадины Земли, разлилась необозримым океаном. Но Земля все еще была горячей. Капли дождя не успевали прикоснуться к камням, как сейчас же снова превращались в пар. Вода в океанах, не переставая, кипела ключом и вздымала вверх густой пар».

По мере остывания Земли вода заполнила все впадины, образуя моря и океаны, а на возвышенностях она текла потоками, стремясь в низкие места, образуя ручьи и реки. В конце концов этот процесс установился, Земля в большей своей части покрывалась водой, образовав прерывистую водную оболочку (гидросферу), или сферу жизни.

Изложенная гипотеза происхождения гидросферы господствовала до начала XX в. В настоящее время существуют гипотезы, объясняющие образование гидросферы исходя из представления о первично «холодном» состоянии Земли и последующем ее разогреве. Вода и газы по этим гипотезам появились на земной поверхности в результате физико-химического процесса внутри Земли — выплавления и дегазации вещества мантии, главным образом легкоплавких базальтов вулканического происхождения, по химическому составу характеризующихся большим количеством оснований (магний, железо, кальций, окислы кальция, натрия и др.). Встречаются и разновидности базальтов, весьма богатых водой. При высокой температуре и давлении базальты плавятся и просачивались к поверхности Земли, неся с собой воду и водяной пар. Главная масса воды поступала на поверхность Земли в результате становления и развития континентов.

Могла ли Земля быть без гидросферы? Безусловно, как и большинство небесных тел. Но тогда она не была бы Землей в нашем понимании, а была бы просто безжизненной планетой Солнечной системы, поверхность которой походила бы на поверхности Меркурия, Марса или Луны, только была бы значительно ровнее последних.

Количество воды на Земле, достигшее определенного уровня, таково, что самая глубокая яма на Земле — Марианская впадина оказалась под слоем воды толщиной 11022 м, а самая большая возвышенность — гора Эверест — поднялась над уровнем океана на высоту 8848 м. Средняя глубина Мирового океана около 3800 м, в то время как средняя высота суши над уровнем моря примерно 875 м.

Материки, представляющие сушу, и земные впадины, представляющие ложе морей и океанов, по своей структуре очень неровные. Однако на суше преобладают высоты ниже 1000 м, а в океанах — глубины от 3000 до 6000 м. Горы и глубоководные океанические впадины являются второстепенными образованиями. На рис. 24 поверхность Земли развернута в фигуру, называемую континентальной «звездой», на которой наглядно показано соотношение поверхности материков, составляющей 29,2 % всей поверхности Земли, и поверхности водных пространств, представляющих прерывистую гидросферу, занимающую в общей сложности 70,8 % всей поверхности Земли.

Поверхность воды в океанах — основная часть поверхности гидросферы — в спокойном состоянии, т. е. при отсутствии волнений, течений, приливов и влияния изменений атмосферного давления, представляет собой геоид. Другими словами, *геоид* — это фигура Земли, ограниченная уровневой поверхностью, продолженной под континенты. Геоид обладает тем свойством, что в каждой его точке сила тяжести направлена по нормали к поверхности. Поверхность геоида совпадает со средним уровнем воды Мирового океана, а на



Рис. 24. Континентальная «звезда» наглядно показывает соотношение материков и гидросферы

материках — с уровнем воды в воображаемых узких каналах, сообщающихся с океаном. Поверхность геоида отклоняется от поверхности эллипсоида в ту или другую сторону на величину, не превышающую 200 м.

Для решения большинства астрономических задач достаточно считать Землю эллипсоидом вращения или, точнее, сфероидом.

Из всей воды, содержащейся в гидросфере, 94 % приходится на морскую воду, 4 % — на подземные или грунтовые воды и примерно 2 % представляют собой льды и снега Арктики, Антарктиды, Гренландии и горные ледниковые области. Лишь менее 0,5 % составляют поверхностные воды суши: озера, реки, различного рода водоемы, почвенные воды, которые играют важнейшую роль в жизни нашей планеты, так как являются основным источником водоснабжения и удовлетворяют потребности человечества, а также животного и растительного мира.

Вода, благодаря своим уникальным свойствам имеет исключительно важное значение для создания на Земле оптимального теплового режима. Без нее была бы невозможна органическая жизнь. Вода — это самая удивительная жидкость. Например, в то время как у всех жидкостей при понижении температуры объем уменьшается непрерывно, у пресной воды он уменьшается лишь до 4°C , а затем увеличивается. Таким образом, 4°C — это температура наибольшей плотности пресной воды. Все жидкости при замерзании уменьшают свой объем, а вода увеличивает его. Она способна растворять в себе значительно больше веществ, чем любая другая жидкость. Все жизненно важные процессы протекают в организме только в водных растворах. Обмен веществ в живом организме возможен лишь тогда, когда продукты обмена растворены, а основной растворитель для них — вода.

Трудно себе представить, что было бы на Земле, если бы вода не обладала таким исключительным свойством. Например, если бы объем воды при замерзании не увеличивался, а уменьшался, как у всех других жидкостей, то лед погружался бы на дно водоемов. Ясно, что в высоких широтах земного шара, где большую часть года господствуют отрицательные температуры, все водоемы сравнительно быстро промерзли бы до дна. Оледенение приполярных районов постепенно распространилось бы на умеренные, а затем и низкие широты. При этом резко возросло бы *альbedo*¹ и Земля уже не могла бы освободиться от оледенения. Между тем, благодаря удивительным свойствам воды даже в Северном Ледовитом океане, где почти круглый год наблюдаются отрицательные температуры, толщина ледяного покрова составляет лишь 2—3 м.

Основная масса льда располагается на материках, главным образом в Арктике, Антарктиде и Гренландии. Если бы этот лед растаял, то уровень Мирового океана повысился примерно на 60 м. При этом 10 % суши оказалось бы под водой. В настоящее время климат Земли медленно изменяется в сторону потепления, что приводит к постепенному отступанию ледников и, как следствие, — поднятию Мирового океана. За последние 25 лет скорость повышения уровня моря составляет в среднем 0,12 см в год.

Гидросфера под воздействием солнечного излучения, испаряясь с поверхностей всех водоемов — от океана до самых малых луж, из почвы и т. д., поступает в виде пара в атмосферу, конденсируется в более высоких слоях атмосферы, образуя туман, облака, и затем выпадает на землю в виде осадков — дождя, снега иногда града. Атмосферные осадки продолжают свой круговорот: собира-

¹ Величина, характеризующая способность поверхности отражать падающий на нее поток электромагнитного излучения или частиц. Важная характеристика планет.

ются в ручьях и реках, текущих в озера, моря и океаны, а также фильтруются через почву и горные породы земной коры и в дальнейшем как грунтовые и подземные воды стекают в реки и другие водоемы, заканчивая круговорот.

Вымытые в процессе круговорота продукты сносятся текущими водами в моря, океаны и замкнутые водоемы, образуя осадочные породы. Подавляющая часть осадочных горных пород образовалась в прошлые геологические периоды в различных водоемах гидросферы. Они несут в себе такие ценные полезные ископаемые, как нефть, уголь, бокситы, различные руды и соли.

По данным различных исследований возраст гидросферы составляет не менее 2 млрд. лет; в ней, как считается, впервые зародилась жизнь на Земле. Как и когда она зародилась, это пока тайна, находящаяся за пределами человеческого познания. Известно, что эволюция организмов продолжалась в гидросфере в течение всего докембрия и лишь в начале палеозойской эры началось постепенное переселение животных и растительных организмов на сушу. Начала формироваться биосфера, которая в наше время включает в себя всю прилегающую к Земле часть атмосферы — *тропосферу*, всю водную оболочку — *гидросферу*, верхнюю часть твердой оболочки Земли — *литосферу*. Верхняя граница биосферы находится в тропосфере на высоте 10—15 км. Биосфера занимает все доступное ей по физическим свойствам пространство, снизу доверху. Нижняя подземная граница ее находится в литосфере, по-видимому, на глубинах до 2—3 км. В биосфере сконцентрировано все живое вещество нашей планеты, от живой клетки до высокоорганизованной материи — человека.

Между неорганической материей биосферы и ее органическим миром происходят разнообразные процессы, связанные общей историей возникновения и развития химических элементов. Например, вода гидросферы растворяет в себе воздух атмосферы, концентрируя при этом кислород, используемый огромным количеством организмов, населяющих гидросферу; происходят и другие подобные реакции, совершенно необходимые для поддержания равновесия во всей живой материи на нашей планете.

Приливообразующие силы. Приливы

Приливы и отливы хорошо известны жителям прибрежных районов океанов и открытых морей. Жители глубинных районов континентов знают об этих величественных явлениях природы зачастую только из книг и понаслышке. Эти явления вызываются силами притяжения Луны и Солнца, которые, перемещаясь относительно Земли, вызывают слабые смещения воды и твердой оболочки.

По своему характеру приливные волны делятся на три категории *полусуточные*, когда в течение лунных суток (24 ч 51 мин) через

равные промежутки времени наблюдают две полные и две малые волны незначительно разные по высоте; *суточные* волны, имеющие период, близкий к суткам; *смешанные* — неправильные полусуточные и неправильные суточные, когда в течение суток наблюдают одну полную и одну малую волну. Кроме трех основных бывают еще аномальные периоды, которые подразделяются: на полусуточные солнечные, полусуточные паралактические, полусуточные мелководные и двойные полусуточные.

Рассмотрим, какое действие производят приливы и отливы на вращающуюся Землю. Каждая частица Земли (твердая, жидкая, газообразная) находится под воздействием возмущающих сил со стороны Луны и Солнца и силы притяжения Земли. В отличие от частиц Земли частицы гидросферы очень податливы к действию сил — они-то и создают в океанах и открытых морях явления, называемые приливами и отливами, главная роль в возникновении которых принадлежит все же Луне. Частицы воды движутся по направлению к притягивающему телу, в данном случае к Луне, и создают гребень — приливообразующую волну. Таким образом, явление приливов и отливов выражается в том, что в береговых зонах океанов и в меньшей степени открытых морей вода через каждые 12 ч 25 мин начинает прибывать, образуя приливную волну; полный суточный период составляет 24 ч 51 мин. Собственно говоря, полная приливная волна является результирующей от сложения двух волн: солнечной с периодом, равным солнечным суткам (24 ч), и лунной с периодом 24 ч 50 мин.

Связь приливов и отливов с действием возмущающей силы со стороны Луны демонстрируется тем фактом, что полный их период совпадает по времени со средним промежуточным временем между двумя последовательными верхними кульминациями Луны. Наблюдения показывают, что высота прилива и падение воды при отливе наибольшие в новолуние и полнолуние (рис. 25), потому что в это время лунные и солнечные приливы и отливы складываются, и наименьшие во время первой и последней четверти Луны, так как в это время лунные приливы совпадают с солнечными отливами, а лунные отливы — с солнечными приливами.

Высота приливной волны в океанах, в особенности в узких проливах или глубоких длинных заливах, иногда достигает десятка метров и более, что наблюдается, например, у восточных берегов Северной Америки.

Выступ лунной приливной волны (высота) всегда направлен к Луне и к точке надира для Луны, но вследствие того, что Земля вращается вокруг своей оси быстрее, чем Луна вокруг Земли, приливная волна перемещается по поверхности океана с востока на запад — навстречу вращению Земли. При своем движении она испы-

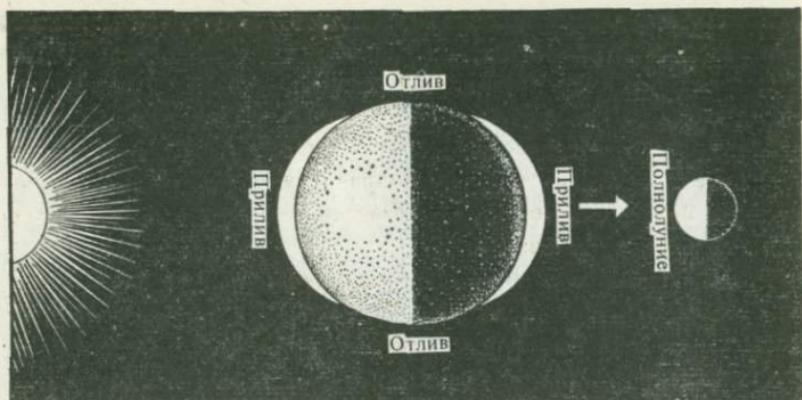


Рис. 25. Новолуние и полнолуние — время наибольшего прилива большой волны

тывает приливное трение о дно океанов и сопротивление со стороны твердых частиц материков и их выступов. Это систематически тормозит движение Земли, что влияет на продолжительность суток, а главное — тормозит, замедляет вращение Земли непрерывно (создает вековое замедление).

Из-за сложности этого природного явления, зависящего от ряда природных причин (попутные или тормозящие ветры и т. п.), существуют неправильности в явлениях приливов и отливов: например, наибольшие приливы не совпадают точно с моментами лунных кульминаций. На периодичность приливов зачастую действуют и астрономические обстоятельства, связанные с движением Луны и Солнца, расстояниями между ними и Землей, изменением отклонений и т. д.

Постоянные изменения взаимных положений Солнца, Луны и Земли создают так называемые неравенства в мощности приливов, выражающиеся в их периодичности. Например, *суточное неравенство*, которое выражается в том, что высоты волн от суток к суткам изменяются; это зависит от широты места и склонения светила. Существует *полумесячное неравенство* между приливами во время сизигий, т. е. в период новолуния и полнолуния, и во время квадратур — Луна в первой и последней четверти. Есть и другие неравенства, каждое из которых характеризуется периодической кривой.

Для практических целей мореплавания достаточно учесть несколько основных волн, например: главную лунную полусуточную с периодом 12,42 ч, главную солнечную полусуточную — период 12,00 ч, большую лунную эллиптическую — период 12,66 ч и некоторые другие.

Приливы в твердом теле Земли

Твердое тело Земли тоже испытывает лунное притяжение, распространяющееся на всю Землю от ее центра до поверхности. Под действием этого притяжения Земля как упругое тело деформируется, причем так, что каждая сферическая ее зона превращается в вытянутый эллипсоид, растягивается по направлению к Луне на величину около 50 см в вертикальном направлении и около 5 см в горизонтальном, вследствие чего и внутренние слои одинаковой плотности представляют собой эллипсоиды, похожие на эллипсоид наружной поверхности.

Сравнение астрономического времени, определяемого по вращению Земли, т. е. из астрономических наблюдений, с атомным временем, независимым от вращения Земли, показывает, что долгопериодические приливы деформируют Землю и изменяют скорость ее вращения. Величина всех приливных эффектов зависит от внутреннего строения Земли, т. е. от плотности и упругих свойств различных слоев на всех глубинах от поверхности до центра. Наблюдения за земными приливами дают возможность изучить внутреннее строение Земли, и в первую очередь ее упругость.

Теория, связывающая наблюдаемые явления земных приливов с внутренним строением Земли, теоретически обосновала явление резонанса между некоторыми суточными земными приливными волнами (например, лунно-солнечной деклинационной суточной волной K с периодом 23,93 ч) и суточной нутацией Земли, вызванной жидким состоянием ядра.

Приливы в Земле исследуются различными методами, а именно: путем сравнения наблюдаемой высоты двухнедельного прилива воды, вызываемого Луной, с теоретически вычисленной в предположении, что Земля абсолютно твердое тело; по величине наклонов земной поверхности, образующихся вследствие деформаций твердого тела Земли, вызываемых действием приливообразующих сил Луны и Солнца; сравнивают наблюдаемое изменение гравитационного поля Земли с вычисленным в предположении абсолютно твердой Земли и по разностям этих величин судят о деформации Земли, вызывающей дополнительное изменение силы тяжести. Изменение силы тяжести, возникающее в результате приливов в твердом теле Земли, составляет примерно 20% основного изменения, обусловленного притяжением Луны и Солнца, и действует в ту же сторону.

АТМОСФЕРА

Атмосфера — сплошная воздушная оболочка, состоящая из механической смеси химических элементов, обволакивает Землю плот-

ным, почти сферическим слоем. Ее основание — нижний, прилегающий к Земле слой пронизывает на значительную глубину весь почвенный поверхностный слой (где нет гидросферы), заполняя все большие и микроскопические полости в Земле. Таким образом, атмосфера представляет собой одно целое с Землей и вращается вместе с ней с той же угловой скоростью.

Атмосфера неоднородна, и ее плотность, начиная от Земли, где она самая большая, убывает с высотой. Верхняя граница очень разреженной атмосферы условна; по наблюдениям за сумерками и полярными сияниями установлено, что на высотах 1100—1300 км концентрация молекул атмосферных газов очень велика, а выше 1300 км никаких следов атмосферы нет.

Атмосфера представляет собой воздушный океан. Масса столба воздуха над одним квадратным сантиметром поверхности около 1 кг. Давление атмосферы распространяется на всю поверхность планеты и на все объекты, находящиеся на ней. На уровне моря это давление составляет 101,3 кПа, с высотой давление убывает, причем тем быстрее, чем выше температура атмосферы. На высоте 8 км оно примерно в 3 раза меньше, чем на уровне моря. На высоте 100 км давление примерно в миллион раз меньше, чем над уровнем моря.

Атмосфера имеет четко выраженную слоистую структуру (рис. 26), и ее условно делят на пять зон: тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу. Границы между зонами называются паузами, при этом нужно иметь в виду, что воздух очень подвижен и паузы — не столбовые дороги, а условные ориентиры, позволяющие разобраться в физических явлениях, возникающих и проходящих в той или иной части атмосферы.

Первая зона, прилегающая к Земле, — *тропосфера*, верхняя граница которой — тропопауза толщиной 1—2 км, расположена на высоте 11—12 км и является границей между тропосферой и стратосферой.

Вторая от Земли зона — *стратосфера* расположена между тропопаузой и стратопаузой и отстоит от Земли в среднем на 35—40 км. Выше стратосферы лежит *мезосфера*, верхняя граница которой — мезопауза расположена на высоте около 80 км.

Четвертая зона — *термосфера* простирается до высоты около 800 км и ограничена снизу мезосферой, а сверху — экзосферой. Вероятно, верхняя граница земной атмосферы лежит около 3000—4000 км. Область выше 800—1000 км называется *экзосферой* (внешняя сфера, или сфера рассеяния). Из этой области непрерывно происходит «утечка» атомов газов (в особенности легких газов — водорода и гелия).

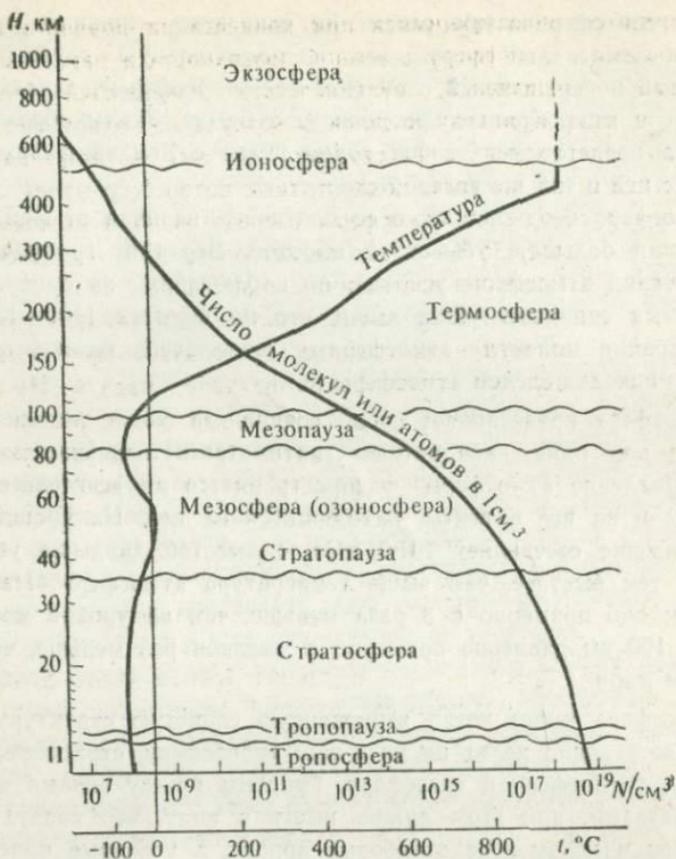


Рис. 26. Атмосфера Земли имеет слоистую структуру

Рассмотрим изменение некоторых параметров атмосферы и главного из них — температуры.

В тропосфере, начиная от поверхности Земли, температура непрерывно падает, средняя скорость ее падения $6,5^{\circ}\text{C}$ на 1 км . На высоте $11\text{--}12\text{ км}$ температура достигает -50°C . Почти такую же температуру имеют нижние слои стратосферы. Выше 25 км она довольно быстро растет, так как тропосфера нагревается инфракрасным излучением земной поверхности, которое очень сильно в ней поглощается из-за большого содержания водяного пара. Давление быстро падает, начинается фотохимическая реакция разложения озона, сопровождающаяся выделением тепла, вследствие чего температура растет и на высоте $50\text{--}55\text{ км}$ (на границе мезосферы) достигает значений $0\text{--}10^{\circ}\text{C}$.

Но это в стратосфере, мы же живем на дне воздушного океана в тропосфере, сильно насыщенной аэрозолями, т. е. мельчайши-

ми частицами, образующимися при конденсации водяного пара и попадающими в атмосферу с земной поверхности в результате промышленных загрязнений, вулканических извержений (пепел от взрыва вулкана Кракатау носился в воздухе несколько лет, следы его были обнаружены на расстоянии 1200 км), а также загрязнения частицами из космоса, концентрация которых убывает с высотой. Причем 50 % всей атмосферы сосредоточено в нижнем пятикилометровом слое, 75 % — в 10-километровом, 90 % — в 16-километровом слоях, а выше она постепенно сходит на нет.

Как мы уже сказали, на высоте около 25 км температура начинает расти и, достигнув на границе стратопauзы максимума (тепловой слой в верхней стратосфере), начинает падать. На высоте 85 км (на границе мезопauзы) температура достигает минимума (-90°C), а выше опять начинает расти, так как на высотах 150—300 км происходит поглощение ультрафиолетового излучения Солнца, обусловленное ионизацией атмосферного кислорода. Над мезопauзой температура растет непрерывно до высоты около 400 км, где она достигает днем в период максимума солнечной активности 1000—2000 $^{\circ}\text{C}$. Выше 400 км атмосфера изотермична и почти не меняется с высотой.

В 10-километровом слое, т. е. практически в тропосфере, сконцентрирован весь водяной пар, который непрерывно поступает в приземной слой атмосферы за счет испарения с поверхности Мирового океана, с влажных поверхностей суши и из других источников. В отдельных местах атмосферы наступает состояние насыщения и водяной пар начинает конденсироваться или сублимироваться, т. е. переходить в жидкое и твердое состояние. Формируются дождевые и грозовые тучи, а в связи с понижением температуры в верхних слоях тропосферы и снежные образования.

Относительно стратосферы нужно сделать одно замечание. В нижней ее части до высоты 25 км температура остается более или менее постоянной. Это происходит оттого, что в нижней части стратосферы инфракрасное излучение, идущее снизу от Земли, поглощается слабо, ее лучистая теплопроводность велика и поэтому мал перепад температуры. Уменьшение инфракрасного поглощения с высотой объясняется тем, что водяной пар вымерзает при падении температуры (она ниже -50°C). Количество водяного пара с высотой быстро убывает.

Распределение температур в стратосфере зависит от времен года. Летом в нижней стратосфере температура убывает при движении от полюсов к экватору от -45 до -70°C . Зимой наиболее высокие температуры отмечаются в умеренных широтах. В верхней стратосфере температура снижается при движении от экватора

к полюсам. Лишь летом в экваториальной и полярной стратосфере она практически одна и та же.

В стратосфере почти нет водяного пара, нет там и обычных облаков, способных давать осадки. Но, несмотря на сухость воздуха, в высоких широтах на высотах 22—27 км иногда возникают состоящие из кристаллов льда и капель переохлажденной воды очень тонкие *перламутровые* облака, которые можно наблюдать лишь в сумерки, когда облака освещены Солнцем, находящимся под горизонтом. В верхних слоях атмосферы на высоте около 60 км и несколько выше становятся существенными ионизационные процессы — появляется ионизованная часть верхней атмосферы — ионосфера, обусловленная ультрафиолетовой корпускулярной и рентгеновской солнечной радиацией, зависящей от условий солнечной активности. Верхней границей ионосферы является внешняя часть магнитосферы Земли. Это природное образование разреженной слабоионизованной плазмы, находящейся в магнитном поле и обладающей благодаря своей высокой электропроводности специфическими свойствами, которые определяют характер распространения радиоволн и различных возмущений. Для изучения всех эффектов нужна единая глобальная модель ионосферы. При рассмотрении электрических свойств атмосферы выделяют ионосферу — слой, в котором воздух сильно ионизован. При этом наблюдается увеличение содержания озона от экватора к полюсам и годовой ход концентрации с минимумом осенью и максимумом весной.

Мезосфера характеризуется падением температуры с высотой. Верхняя граница мезосферы — мезопауза совпадает с минимумом температуры и расположена на высоте около 85 км.

Из-за падения температуры с высотой в мезосфере возможны конвективные и турбулентные движения. На реальность таких движений указывает наличие серебристых облаков, которые иногда наблюдаются под мезопаузой. Они формируются на высоте около 80 км и в летние ночи часто наблюдаются как очень яркие, тонкие, светящиеся *серебристые* облака; впервые они были замечены в 1885 г. В. К. Цераским. Серебристые облака, как и перламутровые, очень тонки и видимы лишь после захода Солнца. О тонкости серебристых облаков свидетельствует тот факт, что через них хорошо просвечивают звезды.

В мезосфере, как и в стратосфере, очень велика амплитуда годового хода температуры воздуха. В нижней ее части происходит изменение фазы годового хода. Если в тропосфере и стратосфере максимальные температуры отмечаются летом, а минимальные — зимой, то в верхней мезосфере наблюдается прямо противоположная картина: зимой — максимум, а летом — минимум температуры воздуха.

Термосфера лежит над мезопаузой. Выше 100 км растет доля легких газов, и на очень больших высотах преобладают гелий и водород; часть молекул газов разлагается на атомы и ионы, образуя *ионосферу*.

Температура и плотность воздуха очень сильно зависят от времени суток и года. С высотой эта зависимость увеличивается. С помощью спутников было установлено, что плотность воздуха днем больше, чем ночью (на высоте 200 км в 1,5—2 раза, на высоте 600 км в 6—8 раз). Это объясняется резким ростом температуры от ночи ко дню.

Воздух — механическая смесь многих газов. Главные компоненты сухого чистого воздуха на уровне моря — азот, кислород, аргон и углекислый газ. По объему азот составляет 78,08, кислород — 20,95, аргон — 0,93 и углекислый газ — 0,03 %. На долю остальных газов — неона, гелия, криптона, водорода, озона и др. — приходится менее 0,01 %. Во всех местах земного шара состав воздуха почти неизменен. Это объясняется тем фактом, что в атмосфере наравне с явлениями диффузии действует турбулентное перемешивание — процесс, в результате которого выравнивается состав газов на всех высотах.

Очень важные составляющие атмосферы — водяной пар, озон и углекислый газ. Количество этих компонентов меняется в широких пределах, как от места к месту, так и день ото дня. Особенно это характерно для водяного пара, содержание которого очень сильно зависит от температуры воздуха. В холодных полярных районах в приземном воздухе содержится в среднем около 0,2 % влаги, а в теплых экваториальных районах — около 3 %. По мере подъема вверх количество водяного пара быстро уменьшается, так как температура быстро падает с высотой. Плотность водяного пара убывает вдвое на высоте около 2 км, в 10 раз на высоте в 6 км и в 100 раз на высоте около 8 км. Выше 10—15 км содержание водяного пара ничтожно мало.

Озон в основном сосредоточен в стратосфере, где он вызывает поглощение ультрафиолетовой солнечной радиации. Он также влияет на атмосферные процессы, особенно на тепловой режим стратосферы.

Количество озона в атмосфере с высотой сначала увеличивается, достигает максимума на высотах 20—30 км, где толщина его слоя достигает 0,23—0,52 см, а затем уменьшается, сходя на нет на высоте около 70 км. Несмотря на ничтожное количество этого газа, он играет большую роль в тепловом режиме атмосферы и, что особенно важно, в создании оптимальных условий для органической жизни на Земле. Наибольшее количество озона наблюдается весной, а наименьшее — осенью и зимой. Количество озона вес-

ной уменьшается при движении от полюсов к экватору. Летом максимальное содержание озона в воздухе наблюдается на широте около 60°. Больше наблюдается озона в областях низкого давления — циклонах и меньше в областях высокого давления — антициклонах.

Основная масса озона в атмосфере расположена в виде слоя на высоте 10—50 км. Этот слой предохраняет живые организмы на Земле от вредного влияния коротковолновой ультрафиолетовой радиации Солнца.

Содержание углекислого газа (CO_2) в воздухе колеблется от 0,02 до 0,04%. Оптимальная норма близка к 0,03%. Важную роль в его регулировании в атмосфере играет Мировой океан; когда атмосфера перенасыщена углекислым газом, Мировой океан поглощает излишек, при недостатке — выделяет, обогащая атмосферу. Углекислый газ поступает в атмосферу при сгорании дерева, угля, бензина, при дыхании, гниении и т. д., а расходуется на питание растений.

Но, по-видимому, в атмосферу Земли поступает значительно больше CO_2 , чем нужно. Последние десятилетия наблюдается рост содержания углекислого газа, обусловленный промышленными загрязнениями. Это может повлиять на климат, так как углекислый газ создает парниковый эффект. Дело в том, что лишний, непоглощенный CO_2 улетучивается и накапливается на определенной высоте в атмосфере, образуя вокруг Земли газовую сферическую оболочку. Подобная оболочка пропускает все коротковолновое излучение Солнца, но задерживает отразившееся от земной поверхности тепловое длинноволновое, накапливая его около планеты, как в ловушке. По гипотезе английского климатолога Хьюберта Лемба, в результате этого процесса через 2,2 тыс. лет можно ожидать повышения средней температуры на всем земном шаре на 6°C. Подобный климат был почти 100 млн. лет тому назад, когда на Земле обитали динозавры. Подобная гипотеза, безусловно, нуждается в серьезной проверке. Однако для благополучия будущих поколений необходимо улавливать все вредные отходы, которые идут в атмосферу Земли.

Атмосфера возникла одновременно с гидросферой около 2 млрд. лет тому назад. Она прошла огромный путь становления — от горячих паров до современного состояния; использовала при этом в течение длительного периода флору и фауну, насыщаясь кислородом и освобождаясь от углекислого газа.

Для человечества и всего живого на Земле гидросфера и атмосфера необходимы для существования, так как снабжают организм влагой и воздухом. Нормальная здоровая жизнь возможна только в безукоризненно чистой биосфере и атмосфере, о чем мы часто

забываем, засоряя их, не думая о будущем. Благодаря нашей беспечности, а зачастую и варварству некоторые представители фауны и флоры находятся на грани исчезновения с лица Земли. Человечеству нужно серьезно задуматься над этим.

МАГНИТОСФЕРА

До начала космических исследований в межпланетном и околоземном космическом пространстве строение магнитосферы Земли, т. е. области пространства, физические свойства которой определяются магнитным полем Земли и его взаимодействием с потоком заряженных частиц космического происхождения (с солнечным ветром), представлялось довольно простым. Считалось, что магнитосфера Земли представляет собой симметричный диполь. Но уже первые прямые измерения магнитных полей в космическом пространстве перевернули эти представления. Оказалось, что магнитосфера Земли крайне асимметрична: со стороны Солнца магнитное поле сильно сжато до расстояния $10R$ (R — радиус Земли), а с противоположной стороны поле очень вытянуто и образует длинный до 1 млн. км магнитосферный хвост (рис. 27). Это является следствием обтекания магнитосферы солнечным ветром. При этом, в зависимости от давления солнечного ветра, граница магнитосферы со стороны Солнца — магнитопауза движется то к Земле (при усилении давления), то от Земли (при его ослаблении). Плазма солнечного ветра обтекает магнитосферу Земли со сверхзвуковой скоростью, поэтому перед магнитосферой образуется ударная волна, отделенная от магнитопаузы переходной областью (см. рис. 27). Фронт ударной волны располагается на расстоянии нескольких десятков тысяч километров от магнитопаузы. На этом фронте плазма солнечного ветра меняет свое направление, происходит уменьшение направленной скорости движения и увеличение хаотической (тепловой) скорости. В результате в переходной области плазма нагревается до десятка миллионов градусов, сильно турбулизуется. Характерны для магнитосферы Земли дневные полярные каспы — воронки вблизи магнитных полюсов Земли, куда возможно прямое проникновение частиц солнечного ветра.

Силовые линии геомагнитного поля, уходящие назад от Солнца, образуют хвост или «шлейф» магнитосферы. Он разделен магнитно-нейтральным слоем на два сектора — северный и южный. В северном секторе поле направлено к Земле, а в южном — от Земли, магнитные силовые линии секторов связаны с полярными областями Земли. В магнитно-нейтральном слое напряженность поля близка к нулю; здесь концентрируется плотная и горячая плазма с температурой около миллиона градусов, которая своим давлением

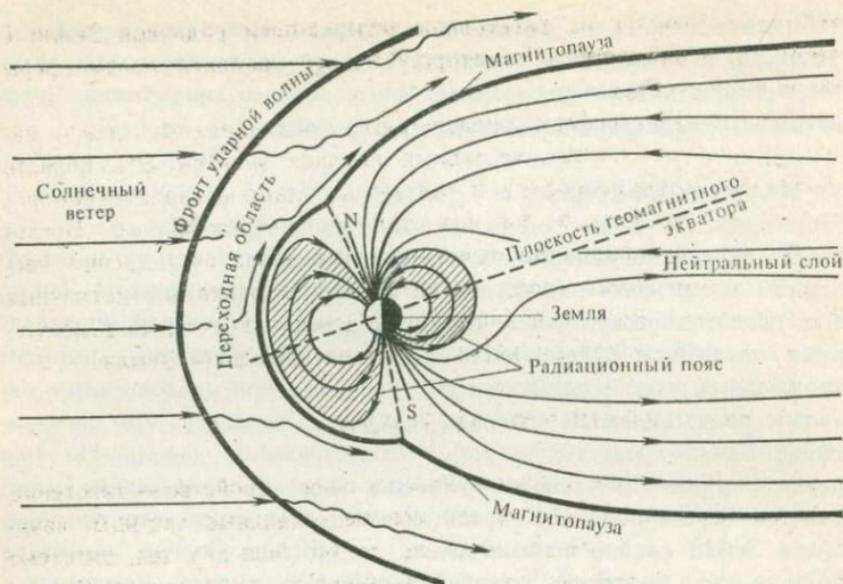


Рис. 27. Магнитосфера Земли

препятствует аннигиляции силовых линий противоположного направления в секторах «шлейфа». Плазменный слой, заключающий более плотную и горячую плазму, охватывает область замкнутых силовых линий, приходящих из Южного полюса в Северный. При усилениях солнечного ветра может происходить закорачивание противоположно направленных магнитных силовых линий в нейтральном слое. Это приводит к освобождению энергии магнитного поля и обеспечивает один из механизмов ускорения заряженных частиц магнитосферной плазмы и их высыпание в авроральных зонах. С этими явлениями связывают возникновение магнитных суббурь и полярных сияний.

Движение плазмы солнечного ветра и межпланетное магнитное поле приводят к возникновению в системе координат, связанной с Землей, электрического поля, которое создает магнитосферную конвекцию. Стационарная магнитосферная конвекция в хвосте магнитосферы направлена от Солнца над полярной областью и к Солнцу — в экваториальной. Магнитосферная конвекция проявляется в ионосфере магнитными возмущениями.

Область магнитосферной плазмы, вращающаяся вместе с Землей, носит название плазмосферы или протоносферы. Она представляет собой продолжение верхней ионосферы и заполнена тепловыми протонами и электронами. На внешней границе плазмосферы — плазмопаузе концентрация плазмы падает примерно на порядок. Плаз-

мопауза находится на расстоянии четырех-пяти радиусов Земли в плоскости геомагнитного экватора. Нижней границей плазмосферы является ионосфера.

Внутри магнитосферы располагаются радиационные пояса, заполненные заряженными частицами высоких энергий. Эта область включает в себя ионосферу и считается областью захваченной радиации или магнитных ловушек для заряженных частиц. Поглощение их в радиационных поясах происходит за счет дрейфа частиц из плазменного слоя магнитосферы в периоды магнитных бурь и за счет медленной диффузии к Земле захваченных в ловушку частиц под действием вариаций магнитного поля Земли.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Материи присуще особое универсальное свойство — тяготение, которое проявляется в том, что все материальные частицы, начиная от атомов и молекул до сколь угодно больших тел, тяготеют друг к другу независимо от их физических и химических свойств и среды, разделяющей притягиваемые объекты.

Вокруг каждой материальной частицы или тела, какую бы форму оно ни имело, возникает область — поле тяготения или, как говорят, гравитационное поле, обладающее тем свойством, что на каждую попавшую в это поле частицу действует вполне определенная по величине и направлению сила.

Подобное гравитационное поле существует и вокруг Земли. Поскольку поле тяготения определяется притягивающими массами, для Земли оно очень сложно. В первом приближении это — поле шара, точнее, поле эллипсоида вращения. Если же мы захотим знать действительное значение поля, то задача очень усложнится. Ведь на величину поля тяготения влияет и распределение масс внутри Земли.

Любая масса, находящаяся на поверхности Земли, участвует вместе с Землей во вращательном движении. На нее действует возникающая при этом центробежная сила инерции, которая, будучи направленной от оси вращения, как бы уменьшает силу притяжения. Сумма сил притяжения Земли и центробежной силы инерции есть *сила тяжести*. Кроме того, на эту массу действуют силы притяжения небесных тел, в основном притяжения Луны и Солнца. Сила тяжести изменяется по мере перемещения по поверхности Земли. Она не может быть постоянной и во времени, а изменяется вследствие перераспределения внутренних масс в результате геотектонической деятельности нашей планеты, изменения положения воздушных масс у ее поверхности и даже перераспределения значительных масс в результате хозяйственной деятельности чело-

века на Земле. Все это влияет на гравитационное поле Земли. Вопрос в том, с какой точностью мы хотим знать это поле.

Гравитационное поле Земли можно характеризовать потенциалом силы тяжести или производной потенциала по силовой линии — ускорением свободного падения или вторыми производными потенциала.

Ускорение свободного падения — это функция, которая чаще всего используется при изучении гравитационного поля Земли; его можно непосредственно измерить. Для этого служат маятниковые приборы, различные типы гравиметров, установки для абсолютного измерения силы тяжести. Приблизительно ускорение свободного падения на Землю — 980 см/с^2 . В честь Галилео Галилея внесительную единицу ускорения назвали *галом* ($1 \text{ Гал} = 1 \text{ см/с}^2$).

Вторые производные потенциала — функции, быстро изменяющиеся. Их тоже можно измерить вариометрами, градиентометрами. Вторыми производными пользуются, когда нужно знать локальные особенности поля.

Итак, если для каких-либо целей достаточно считать Землю шаром, то радиус его 6370 км , средняя плотность $5,52 \text{ г/см}^3$, ускорение свободного падения 980 см/с^2 .

Следующее приближение — эллипсоид вращения. Тогда на поверхности Земли ускорение свободного падения меняется по закону

$$g = \gamma_e (1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta_1 \sin^2 2\varphi), \quad (a)$$

где g — ускорение свободного падения; φ — широта места наблюдения; γ_e , β , β_1 — некоторые постоянные величины. Если принять, что Земля трехосный эллипсоид, то ускорение свободного падения будет зависеть и от долготы места наблюдения. Для вычисления значений всех постоянных используют измеренные значения ускорения в разных точках планеты. В настоящее время по международному соглашению приняты следующие постоянные γ_e , β и β_1 :

$$g = 978,0318 (1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi). \quad (b)$$

Аналитически удобно представить гравитационное поле Земли рядом сферических функций. Оставляя в ряду то или иное количество членов, получаем поле с желаемой точностью. Конечно, здесь будет много постоянных коэффициентов, которые требуют определения. И точность, с которой возможно их определить, лимитирует целесообразность включения соответствующих членов разложения в выражение, которым представляется поле. Точность определения коэффициентов лимитируется количеством измеренных значений ускорений. Так, теоретическое представление о гравитационном поле и технические возможности измерения тесно связа-

ны и развиваются параллельно. По современным данным ускорение свободного падения на полюсе — 983,2, на экваторе — 978,0 см/с².

Для удобства изучения гравитационное поле Земли представляют суммой двух частей. Первая — это сглаженное поле, представленное формулами (а) и (б) и называемое *нормальным полем* силы тяжести. Вторая часть — это все, что остается от действительного поля, если из него вычтеть нормальное. Это — *аномалии* силы тяжести.

Аномалии, т. е. отклонения от нормального поля, на Земле достигают +0,669 м/с² (на Гавайских островах) и — 0,338 м/с² (у Антилских островов).

Таким образом, изучение гравитационного поля Земли сводится к изучению аномалий этого поля. Как уже говорилось, на значение гравитационного поля Земли оказывают влияние самые различные факторы. Некоторые из них, малые по величине, можно вычислить теоретически, но не удастся обнаружить практически из-за ограниченной точности измерений.

При измерениях обнаруживаются лунно-солнечные приливные изменения ускорения свободного падения. Это — периодические изменения, возникающие из-за отклонения положения данной точки земной поверхности относительно Луны и Солнца, что происходит при вращении Земли. Приливные изменения достигают $2,4 \cdot 10^{-8}$ м/с². В результате этого в течение суток вес тела в 9,8 кН изменяется до 1,96 мН.

Неприливные изменения гравитационного поля могут носить различный характер: глобальный (т. е. для всей Земли в целом), региональный и локальный.

Теоретически причинами глобальных изменений поля могут быть: 1) факторы, вызывающие неравномерность вращения Земли, 2) перестройка земной коры, 3) изменения положения оси вращения в теле Земли, 4) геодинамические явления, 5) сезонные колебания уровня Мирового океана, 6) глобальные перемещения атмосферных масс. Влияние каждой из перечисленных причин изменения поля очень незначительно. Современная самая точная аппаратура (гравиметры Аскания G-S-11, гравиметры Ла-Коста-Ромберга) позволяет в лучшем случае производить измерения до $(5-10) \cdot 10^{-8}$ м/с², т. е. описанные эффекты находятся на пределе возможностей измерительной техники, поэтому практического подтверждения они пока не имеют.

Наблюдаются региональные и локальные неприливные изменения ускорения силы тяжести. Уверенно фиксируются колебания поля, вызываемые совокупностью явлений, предвещающих или сопровождающих извержение вулканов. Эти изменения ничтожны. Для регистрации малых колебаний гравитационного поля Земли

на территории многих государств по всей поверхности планеты устраиваются геодинамические полигоны, где устанавливается самая точная стационарная аппаратура.

Изучение гравитационного поля Земли — задача глобального характера; она одинаково интересная и нужная для ученых разных стран.

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

ОРИЕНТАЦИЯ НА НЕБЕ; НЕБЕСНЫЙ ЭКВАТОР, ЭКЛИПТИКА

Из видимых движений Солнца еще в древности были известны два: суточное — с востока на запад — как следствие вращения Земли вокруг своей оси и годичное — с запада на восток — со скоростью примерно 1° в сутки, являющееся следствием движения Земли вокруг Солнца. Сущность этих движений была раскрыта Н. Коперником в его знаменитой книге «Об обращении небесных шаров», вышедшей в свет в 1543 г.

Видимый годичный путь Солнца среди звезд с запада на восток, проходящий по созвездиям Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей и Рыбы, называется *эклиптикой*. Эклиптика — это большой круг небесной сферы, наклоненный к небесному экватору под углом $23^\circ 27'$. Годичный путь Солнца среди звезд легко обнаружить простейшими наблюдениями. Посмотрим, например, 1 января в полночь, когда Солнце находится в меридиане в нижней кульминации, на южную часть неба и заметим, какие из хорошо известных созвездий находятся в меридиане или вблизи него. В это время угол между замеченными созвездиями и Солнцем равен примерно 180° . Если посмотреть на этот же участок неба около меридиана спустя три месяца тоже в полночь 1 апреля, то знакомых созвездий там не окажется. Они будут на горизонте и даже под горизонтом на западе; угол между ними и Солнцем составит примерно 90° . Иначе говоря, за три месяца Солнце сместилось на эклиптике на угол около 90° , проходя ежедневно примерно около 1° . Экватор и эклиптика пересекаются в диаметрально противоположных точках. Одна из них, через которую Солнце проходит 21 марта (рис. 28), двигаясь из южного полушария небесной сферы в северное, называется *точкой весеннего равноденствия*. Диаметрально противоположная ей, где Солнце бывает 23 сентября, переходя из северного полушария небесной сферы в южное, — *точкой осеннего равноденствия*. Точки эклиптики, удаленные от точек весны и осени

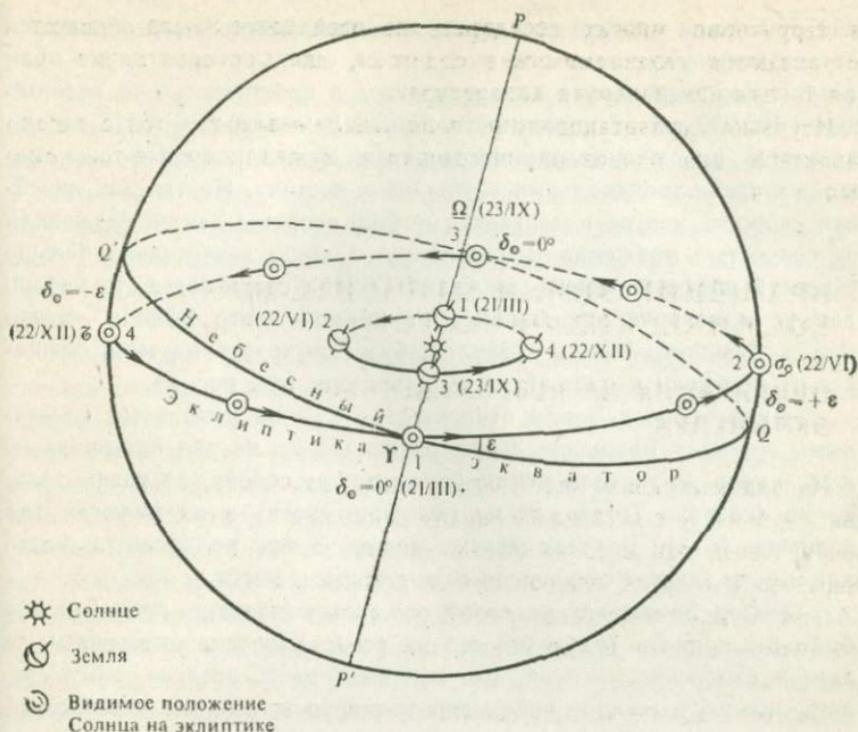


Рис. 28. Небесный экватор и эклиптика.

Основные точки их пересечения: Υ — весеннего и Ω — осеннего равноденствий, \odot — летнего и \oslash — зимнего солнцестояний

на 90° , называются *точками солнцестояний*: летнего, через которую Солнце проходит 22 июня, и зимнего, в которой Солнце бывает 22 декабря.

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО СОЛНЦА

Величайшим фактором для жизни человечества явилось то, что Земля при своем формировании благодаря какому-то неизвестному нам импульсу получила устойчивое вращательное движение вокруг оси, создав тем самым день и ночь, что явилось основным условием появления на Земле умеренного климата, способствовавшего впоследствии возникновению всевозможных живых организмов, в том числе и человека. Без вращения Земли жизни на ней не было бы хотя бы потому, что на освещенной стороне Земли температура поднялась бы на несколько сотен градусов, а на темной — упала до -200°C .

Солнце освещает только одну половину Земли; на противополож-

ной от Солнца стороне вследствие непрозрачности Земли образуется от нее коническая тень (см. рис. 1 и 2), около которой царит мрак (ночь). Вершина конуса тени находится в пространстве на расстоянии 1 400 000 км от поверхности Земли. Земля вращается с запада на восток, и Солнце вследствие движения Земли по орбите тоже смещается среди зодиакальных созвездий к востоку. Но так как линейная скорость центра поверхности ночной стороны Земли, сложенная со скоростью движения Земли вокруг Солнца значительно больше скорости поступательного движения Солнца среди звезд, то наблюдатель, в полночь находящийся на прямой центр Солнца — центр Земли, вращаясь вместе с Землей, будет выходить из тени, смещаясь от полуночи к рассвету, т. е. к востоку (см. рис. 2).

Период оборота Земли относительно Солнца называется *солнечными сутками*. Вращение Земли разделило их на два интервала — день и ночь. Интервалы эти не равны между собой; они равны только на экваторе (содержат по половине суток) и на полюсах (по половине года). Во всех других местах Земли продолжительность дня и ночи зависит от времени года и широты места.

Оборот Земли вокруг своей оси, или солнечные сутки, можно было бы принять (разделив его на более короткие интервалы) за эталон измерения времени. Но, как выяснилось позднее, этого сделать нельзя: солнечное время неравномерно вследствие неравномерности движения Земли по орбите и наклона плоскости эклиптики к плоскости экватора. Оказалось очень сложным сделать такие часы, которые шли бы в течение года в соответствии с движением Солнца. Поэтому было введено искусственное — фиктивное среднее Солнце, равномерно движущееся по экватору, установлены средние солнечные сутки и среднее солнечное время, которое и явилось эталоном измерения времени. Средние солнечные сутки были разделены на более мелкие единицы — часы, минуты и секунды.

Время имеет огромное значение в нашей жизни, и потому определение и хранение его — очень важная задача. Точное время определяется по наблюдениям небесных светил на обсерваториях, где имеются точные астрономические инструменты и часы. Затем через сеть всесоюзного радиовещания каждый час передаются сигналы в виде шести радиоимпульсов длительностью до 0,1 с и периодом следования 1 с. Начало шестого импульса соответствует началу часа 00 мин 00 с. Для нужд различного рода экспедиций, морского и океанского, надводного и подводного транспорта, организаций, связанных с космическими полетами, метеорологических учреждений и др. Государственная служба времени и частоты (ГСВЧ) СССР транслирует по особому расписанию через отечественные радиостанции систему специальных сигналов точного времени в разные часы и с различными характеристиками.

Один оборот относительно Солнца, звезд и Луны Земля делает не за одинаковое время. Это происходит потому, что Солнце и Луна, двигаясь среди зодиакальных созвездий, имеют собственное движение с запада к востоку. Солнце ежесуточно проходит дугу $59'$, Луна же — $13,2^\circ$. Звезды и созвездия остаются неподвижными (пренебрежем собственными движениями звезд). Полный круг по небесной сфере Солнце делает за 365,25 солнечных суток, Луна — за 27,32 суток.

Рассмотрим вращение Земли относительно звезд. Это можно сделать только с помощью хороших астрономических часов, которые прошли путь от песочных до атомных. Воспользуемся солнечными часами, т. е. часами, идущими по среднему солнечному времени. Измерим с помощью их и астрономических инструментов промежутки времени между двумя последовательными восходами одной и той же звезды или между двумя прохождением ее через меридиан. Это и есть звездные сутки, или период одного оборота Земли вокруг своей оси относительно звезд. Он оказывается равным 23 ч 56 мин 04,091 с. Если подобные наблюдения провести за Солнцем, допуская, что оно движется равномерно, то выяснится, что период между двумя последовательными прохождением (кульминациями) его через меридиан равен 24 ч. Таким образом, Земля относительно звезд вращается быстрее и звездные сутки короче средних солнечных на 3 мин 55,91 с потому, что Солнце смещается среди звезд с запада к востоку, т. е. в направлении вращения Земли.

Восходы и заходы звезд значительно отличаются от восходов и заходов Солнца тем, что последнее в зависимости от времени года восходит то южнее, то севернее точки востока и заходит то южнее, то севернее точки запада, тогда как каждая из звезд восходит и заходит на данной широте всегда в одном и том же месте горизонта, но они ежесуточно восходят раньше восхода Солнца на четыре минуты (точнее, на 3 мин 55,91 с). Так, если сегодня в полночь наблюдается восход звезд созвездия Орион, то через три месяца тоже в полночь Орион будет находиться в меридиане, а восходить будет созвездие Льва.

В средних широтах звезды по восходам и заходам делятся на две группы. Звезды незаходящие все время находятся над горизонтом и в своем суточном движении описывают относительно полюсов мира почти окружности; в Северном полушарии движение звезд происходит против часовой стрелки, в Южном — по часовой.

Звезды восходящие и заходящие соответственно восходят во всей части восточного горизонта и заходят в западной. Наклон их видимых суточных круговых движений над горизонтом зависит от широ-

ты места. Так как солнечное время неравномерно, а Земля вращается относительно звезд значительно стабильнее и звездные сутки короче средних солнечных, т. е. составляют 23 ч 56 мин 04,091 с, то для научных целей пользуются звездным временем, которое измеряют с помощью первоклассных, в настоящее время атомных, часов, дающих очень высокую точность.

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЛУНЫ

На дневном небе утром или вечером часто можно видеть Луну, поэтому ее нельзя считать только ночным светилом. Луна — темное тело и светит только отраженным солнечным светом, при этом одновременно освещена бывает только одна ее половина. При своем движении среди звезд Луна, имея большую угловую скорость, чем Солнце, периодически обгоняет его и по отношению к Земле находится на разных угловых расстояниях (иначе говоря, долготе) от Солнца. Освещенная часть Луны обращена к Солнцу, наблюдатель на Земле видит только ту половину Луны, которая обращена к Земле и освещена частично. Последовательные изменения в течение месяца видимой формы Луны называются *фазами Луны*, а полоса, отделяющая освещенную Солнцем часть от темной, — *терминатором*. Если бы Луна имела точную форму шара и ее поверхность была бы гладкой, то терминатор являлся бы эллипсом, отделяющим дневную поверхность Луны от ночной. В действительности же поверхность Луны неровная, имеет выступы, углубления, различного рода кольцевые образования — кратеры, горы и другие неровности. Эти выступы во время восхода или захода Солнца освещаются неодновременно, создавая для земного наблюдателя кажущуюся картину сплошного пояса, охватывающего Луну.

Терминатор, как кольцо, вращается около одного диаметра (перпендикуляра к плоскости эклиптики, проходящего через центр Луны) по часовой стрелке (если смотреть с северного полюса Луны).

Если бы Луна занимала по отношению к небесному экватору неизменное положение, иначе говоря, ее склонения оставались бы все время неизменными, то вследствие вращения Земли восходы и заходы Луны всегда происходили бы в одних и тех же точках горизонта. Но Луна смещается по зодиакальным созвездиям с запада к востоку ежесуточно на $13,2^\circ$, поэтому она восходит и заходит то южнее точек востока и запада, то севернее их, отклоняясь по горизонту в ту или другую сторону на угол, не превосходящий $28^\circ 36'$, в зависимости от лунной долготы. Из-за смещения Луны среди звезд на запад ее восходы и заходы запаздывают, отстают от восходов и заходов Солнца ежесуточно более чем на 50 мин.

Одна из фаз Луны, которую условно можно считать начальной,

называется *новолунием*. В новолуние все три тела (Солнце, Луна и Земля) на короткое время располагаются в пространстве примерно на одной прямой, причем Луна — между Солнцем и Землей; в это время освещенная сторона Луны находится в стороне, противоположной Земле, а темная обращена к Земле, поэтому на фоне темного неба Луны не видно. Не случайно студенты на экзаменах зачастую называют эту фазу «безлунием».

Если мы повернемся лицом на запад, то увидим Луну только спустя 2—3 дня сразу после захода Солнца в виде узкого освещенного серпика, обращенного горбиком к горизонту и вправо, т. е. к Солнцу. Ориентация серпика относительно горизонта может быть самой различной в зависимости от положения Луны на своей орбите, Солнца — на эклиптике и наблюдателя на Земле.

В практике встречается случай, когда молодая Луна (в возрасте 2—4 дней) и Солнце одновременно находятся на небесном экваторе ($\delta_{\text{С}} = \delta_{\text{Л}} = 0$) или близко к нему недалеко друг от друга. Тогда наблюдатель, находящийся на экваторе Земли (допустим, на судне в океане), может наблюдать, как серпик Луны, обращенный горбиком вниз, после захода Солнца будет приближаться к горизонту, смещаясь по первому вертикалу (рис. 29). Если через рожки этого серпа провести отрезок прямой, то он расположится параллельно горизонту. При спокойном океане наблюдатель увидит, как серпик Луны коснется своим горбиком видимого горизонта; тогда Луна в этой бескрайней водной пустыне будет казаться одинокой светящейся «лодочкой», заброшенной в дали безбрежного океана. Спустя немного времени «лодочка» погрузится во мрак этой кажущейся бесконечной бездны. Описанную картину неоднократно наблюдали моряки.

Если же одновременное расположение Луны и Солнца на экваторе наблюдать, допустим, с Северного полюса Земли, то можно увидеть, как вслед за Солнцем по видимому горизонту движется серпик Луны, стоящий на одном из своих рогов на горизонте.

При дальнейшем движении Луны и Солнца разность их долгот будет увеличиваться, серпик будет полнеть и через 7,4 сут после новолуния наступит следующая фаза Луны — ее первая четверть, при которой долгота Луны больше долготы Солнца на 90° . В это время освещена половина видимого с Земли полушария Луны с западной стороны. Во время первой четверти очень хорошо видны лунные об-



Рис. 29. Наблюдатель вблизи экватора Земли, Луна вблизи первого вертикала небесной сферы

разования около терминатора. Следует заметить, что в период между новолунием и первой четвертью Луна бывает видима вся, только не освещенная Солнцем часть ее светит много слабее, чем освещенная, и имеет тусклый так называемый пепельный свет, являющийся, по существу, отраженным от поверхности Земли солнечным светом.

Через 14,8 сут, когда разность долгот Луны и Солнца будет близка к 180° , наступит следующая фаза — полнолуние, при котором освещена вся половина Луны, обращенная к Земле. Это самое неподходящее время для наблюдения деталей многих лунных образований.

Еще через четверть, т. е. через 22,1 сут от новолуния, наступит последняя четверть — фаза, когда Луна будет восходить после полуночи, а при восходе Солнца будет в меридиане. В этот период хорошо наблюдать ее восточную часть. Затем Луна опять пойдет к новолунию и будет восходить серпиком, обращенным горбом к востоку.

Восходы и заходы Луны приходятся на самые различные часы суток. Когда Луна в новолунии, она восходит и заходит примерно в одно время с Солнцем. Ночи наиболее темные в первой четверти, когда долгота Луны больше долготы Солнца на 90° ; она восходит примерно в полдень и заходит в полночь; первая половина ночи светлая. В полнолуние при разности долгот 180° Луна восходит во время захода Солнца, а заходит во время его восхода, т. е. видима всю ночь. В последней четверти восход Луны — в полночь, а заход — в полдень. Чередование восходов и заходов Луны происходит вследствие того, что ее восходы ежесуточно отстают от восходов Солнца на 40 минут, так как Луна собственным движением перемещается среди звезд с запада на восток на $13,2^\circ$ в сутки. Что касается места восхода и захода Луны на горизонте, то оно отстает от точек востока и запада на еще большую величину, чем восходы и заходы Солнца, так как орбита Луны наклонена к эклиптике на угол $5^\circ 9'$, вследствие чего она движется всегда вблизи эклиптики. Наиболее высоко над горизонтом Луна бывает около дня зимнего солнцестояния, а наиболее низко — около дня летнего солнцестояния, т. е. чем выше Солнце в полдень, тем ниже Луна в полночь, и наоборот. Именно поэтому в летние месяцы Луна, как правило, редко видна на небе: ночью она находится вблизи горизонта, а днем хотя и высоко над горизонтом, но скрывается в лучах Солнца.

В жизни человека восходы и заходы Солнца и Луны, а также продолжительность дня имеют большое значение. Поэтому астрономы заранее, на несколько лет вперед, вычисляют и публикуют таблицы восхода Луны и Солнца, а также таблицы долготы дня для разных широт земного шара.

ВОСХОДЫ И ЗАХОДЫ СВЕТИЛ НА РАЗНЫХ ШИРОТАХ ЗЕМЛИ

Вследствие суточного вращения Земли около своей оси все наблюдаемые нами небесные светила движутся параллельно небесному экватору. В зависимости от географической широты места наблюдения и склонения светила их суточные параллели либо пересекают горизонт в двух точках, либо целиком располагаются над ним или под ним. Явления восходов и заходов светил в привычных нам широтах известны всем народам и во все времена. Наблюдая светила в течение нескольких часов, можно заметить, что они находятся в непрерывном движении: видимые на востоке поднимаются выше, на юге движутся к западу, а находящиеся на западе опускаются к горизонту и заходят. Однако на земном шаре есть пять параллелей и две точки, где видимые движения светил (восходы и заходы) отличаются некоторым своеобразием: это полюсы, полярные круги, тропики и экватор. Для наблюдателя, находящегося на экваторе Земли, полюсы мира лежат на горизонте, ось мира в плоскости горизонта совпадает с полуденной линией; все звезды небесного свода, восходящие и заходящие, кроме экваториальных, поднимающихся по большому кругу, взойдя, поднимаются над горизонтом по сферическим перпендикулярам по малым кругам, ровно половину пути бывают над горизонтом и половину — под горизонтом. Солнце в своем суточном движении дважды в году (21 марта и 23 сентября) восходит в точке востока, проходит через зенит и заходит в точке запада; 22 июля оно отклоняется от зенита на $23^{\circ}27'$ к северу, а 22 декабря — на такую же величину к югу. С Луной явление более интересное. Небесный экватор и проекция орбиты Луны на небесную сферу как два больших круга пересекаются в двух диаметрально противоположных точках сферы. В течение своего сидерического периода (т. е. периода движения Луны относительно звезд), равного 27,32 сут, Луна дважды пересекает экватор. Следовательно, от одного пересечения до другого проходит 13,66 сут. При каждом пересечении экватора Луна проходит вблизи зенита. Пересечений же будет $365,25 : 13,66 = 26,74$. Следовательно, в своем суточном движении для наблюдателя, находящегося на экваторе Земли, Луна пройдет через зенит 26 или 27 (если первое прохождение произойдет в начале года) раз.

Что касается движения планет, то плоскости их орбит лежат вблизи плоскости эклиптики, почти все планеты восходят вблизи точки востока и проходят через зенитную зону, т. е. планеты лучше всего наблюдать на экваторе.

Особенно интересны наблюдения для наблюдателя, находящегося на полюсах Земли (например, на Северном). Там ось мира совпада-

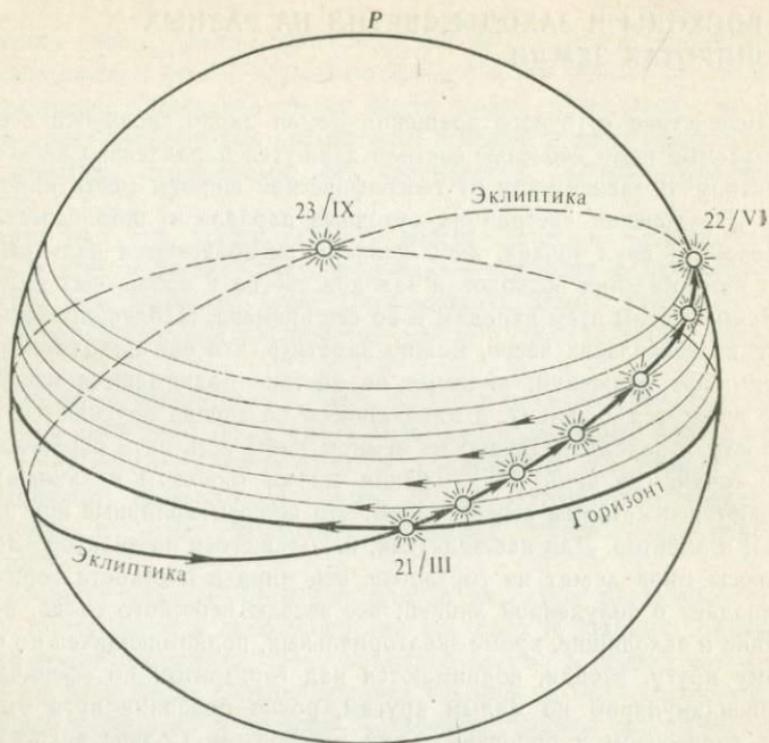


Рис. 30. Годичное и суточное движение Солнца для наблюдателя на полюсе Земли.

При подъеме Солнца до высоты $23^{\circ}27'$ (22 июня) число витков спирали равно 91

ет с направлением в зенит, плоскость экватора — с плоскостью горизонта; небесного меридиана и первого вертикала нет. Стран света тоже нет: куда ни повернись — везде юг. Детская загадка: где построить дом, чтобы окна на всех четырех стенах дома были обращены на юг? Только на Северном полюсе.

Для наблюдателя на полюсе Земли полюс мира совпадает с зенитом, ось мира перпендикулярна к горизонту и небесный экватор совпадает с истинным горизонтом. Вследствие этого примерно только половина звезд неба, которые делятся на невосходящие и незаходящие, доступна наблюдению. Последние в своем движении описывают круги, параллельные горизонту. Солнце, взойдя 21 марта, полгода находится над горизонтом, поднимается в течение трех месяцев на высоту $23^{\circ}27'$ (рис. 30) и в течение трех месяцев опускается к горизонту; уйдя под горизонт, оно не показывается в течение полугода — стоит полярная ночь. Луна после восхода 13—14 суток находится над горизонтом, половину этого времени поднимается над ним на высоту, не превосходящую $28^{\circ}36'$, затем опускается и на такое же

время уходит под горизонт. Во время подъема от восхода до максимальной высоты Солнце, описывая спираль, делает 92,8 витка, во время спуска до точки захода — 93,6. Разница в витках вызывается эллиптичностью орбиты Земли.

Не менее интересна картина восхода и захода светил в тропиках и на полярных кругах. Для примера рассмотрим Северный полярный круг. Небесный экватор наклонен к горизонту на $23^{\circ}27'$; 21 марта и 23 сентября Солнце в своем суточном движении на эту же величину поднимается над горизонтом — день равен ночи. 22 июня, в день летнего солнцестояния, Солнце в истинный полдень будет на высоте $46^{\circ}54'$. Малый круг небесной сферы, параллельный экватору, по которому в этот день Солнце описывает суточную параллель, будет проходить через точку севера. Значит, в 24 часа Солнце опустится под горизонт около точки севера на половину своего диска и начнет подниматься — восходить; один день в году ночи не бывает. В отличие от средних широт, где Луна на севере не бывает, на полярном круге она будет проходить через точку севера 13 иногда 14 раз в году. 22 декабря, в день зимнего солнцестояния, в полночь Солнце будет на $46^{\circ}54'$ ниже точки севера — под горизонтом. Его суточная параллель в этот день имеет отрицательное склонение — $23^{\circ}27'$ и проходит через точку юга. Следовательно, в этот день в своем суточном движении в полдень Солнце только покажется из-за горизонта около точки юга на половину своего диска и опять будет опускаться — заходить; один раз в году дня не бывает. Луна же может проходить через точку юга не один раз в году, как Солнце, а 13, иногда 14 раз.

ВОСХОДЫ И ЗАХОДЫ ПЛАНЕТ

Восходы и заходы планет, которые светят отраженным светом Солнца, имеют некоторые особенности. Невооруженным глазом можно наблюдать только Венеру, Марс, Юпитер и Сатурн. Что касается самой близкой планеты к Солнцу — Меркурия, то его можно увидеть только утром перед восходом Солнца или вечером сразу после захода Солнца.

Вследствие того что орбиты планет имеют малые наклоны к плоскости эклиптики, отклонения их восходов и заходов от точек востока и запада незначительны, но происходят они в разное время суток. В то время как моменты восходов и заходов нижних планет (Меркурия и Венеры) недалеко отклоняются от Солнца по положению и времени, моменты восходов и заходов верхних планет могут приходиться на любое время суток в зависимости от их долгот на своих орбитах. Так, представительница нижних планет — Венера во время нижнего и верхнего соединения с Солнцем восходит и заходит одно-

временно с ним. Когда она бывает восточнее Солнца, то заходит и восходит позднее его и вечером видна на западе низко над горизонтом как яркая звезда, за что еще в древности получила в народе название «вечерней звезды». Когда Венера правее Солнца, она восходит и заходит раньше его, появляясь на восточном горизонте до восхода Солнца в виде «утренней звезды».

Так как Венера, как и Луна, имеет фазы, блеск ее изменяется; во время наибольшего блеска ее звездная величина $m = -4$, т. е. она ярче звезды первой величины в 100 раз.

Верхние планеты, когда они находятся в соединении с Солнцем (долгота планеты равна долготе Солнца), восходят и заходят вместе с ним. Если долгота планеты больше долготы Солнца на 6 ч, она восходит в полдень и заходит в полночь. Когда верхняя планета находится в противостоянии, она восходит при заходе и заходит при восходе Солнца.

ДОЛГОТА ДНЯ

От того, в каком месте горизонта восходит Солнце, зависит долгота дня — промежуток времени между восходом Солнца и его заходом. Зачастую в обиходе под долготой дня подразумевают продолжительность светлого времени, включая, таким образом, в день и гражданские сумерки, которые кончаются в момент, когда центр Солнца опустится на 7° под горизонт. В сумерки на открытой местности при хорошей прозрачности воздуха освещенность вполне достаточна для выполнения любых работ.

Продолжительность дня зависит от географической широты места и склонения Солнца. Так, на земном экваторе она постоянна в течение всего года и равна 12 ч. Заметим, что здесь не учитывается рефракция, которая удлиняет день против ночи на 4 мин. В дни равноденствий продолжительность дня всюду между полярными кругами равна 12 ч. Наибольшая долгота дня в Северном полушарии Земли бывает в день летнего солнцестояния, наименьшая — в день зимнего. В Южном полушарии Земли — наоборот: наибольшая продолжительность дня в день зимнего солнцестояния и наименьшая — в день летнего. Долготу дня можно вычислить по простой формуле: $\cos t_0 = -\operatorname{tg} \delta_0 \operatorname{tg} \varphi$, где t_0 — часовой угол Солнца при восходе или заходе, δ_0 — его склонение и φ — географическая широта места.

Большинство граждан СССР пользуется отрывным календарем, в котором указываются на каждый день года моменты восхода и захода Солнца и Луны, а также долгота дня для Москвы.

Моменты восхода и захода Солнца и Луны с 1 апреля по 30 сентября включительно даются по летнему времени.

ДВИЖЕНИЕ ОСИ ВРАЩЕНИЯ В ТЕЛЕ ЗЕМЛИ

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ

Если принять Землю за твердый однородный шар, то широтой места наблюдения φ будет угол между отвесной линией в этом месте и плоскостью земного экватора, а долготой λ — двугранный угол между плоскостями меридианов Гринвичского NB и места наблюдения NMQ .

Но Земля — не шар и неоднородна; воспользуемся вторым приближением фигуры Земли и примем ее за сплюснутый эллипсоид вращения. У такой фигуры экватор — окружность и все меридианы — эллипсы. Возьмем на меридиане точку M — пункт наблюдения, из которого в плоскости этого меридиана (разумеется, перпендикулярной плоскости экватора) проведем три направления, а именно: из места наблюдения в центр эллипсоида (QM) перпендикуляр к касательной линии к меридиану в месте наблюдения (Mg) и отвесную линию. Получим три угла, которые дадут нам геоцентрическую, геодезическую и астрономическую, или географическую, широту, что одно и то же (рис. 31).

Астрономическая широта φ — угол, образуемый отвесной линией в данном месте с плоскостью земного экватора. Она равна высоте полюса мира под горизонтом в данном месте и определяется из наблюдений небесных светил при помощи инструментов, устанавливаемых по уровню. В геодезии и картографии применяется *геодезическая широта* φ_1 — угол, который образует нормаль к меридиану земного эллипсоида в точке наблюдения с плоскостью земного экватора. Геодезическая широта определяется по результатам геодезических измерений, приведенным к поверхности земного эллипсоида. Геодезическая широта получается из астрономической широты, если учесть уклонение отвеса, которое можно вычислить по гравиметрическим наблюдениям. *Геоцентрическая широта* φ' — угол при центре Земли, образуемый радиусом-вектором точки с плоскостью экватора.

Переход от геодезической широты точки к ее геоцентрической широте осуществляется по формуле

$$(\varphi_1 - \varphi') = \frac{1}{2} 206264,8 (2\alpha - \alpha^2) \sin 2\varphi,$$

где α — сжатие земного эллипсоида. Можно также использовать формулу

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{b^2}{a^2} \operatorname{tg} \varphi_1,$$

где a и b — полуоси земного эллипсоида.

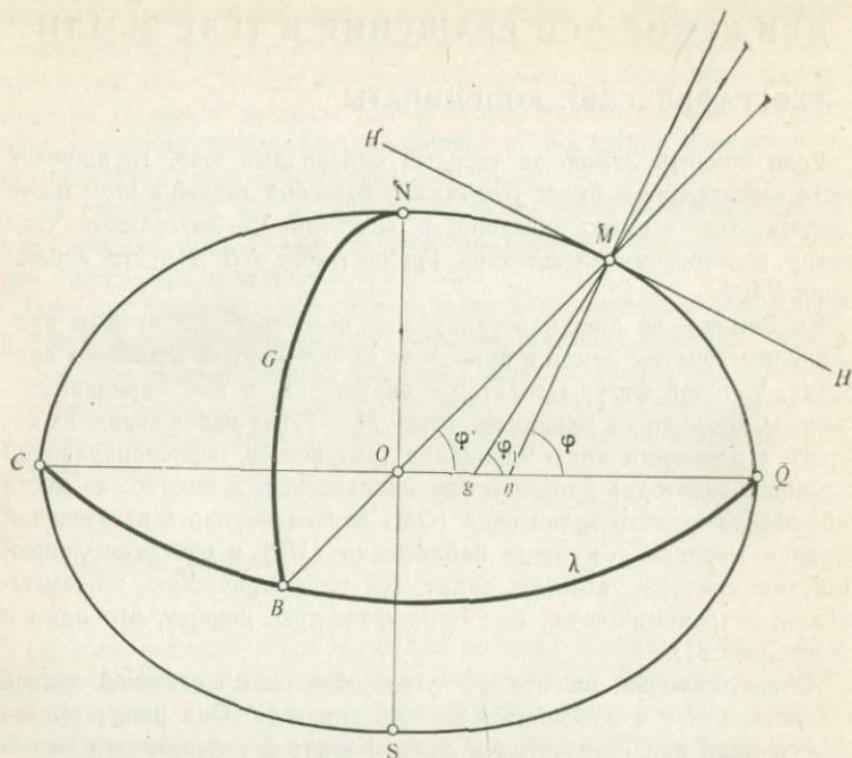


Рис. 31. Географические широты на эллипсоиде.

Φ — астрономическая (географическая), Φ_1 — геодезическая; Φ' — геоцентрическая; угол $QOB = \lambda$ — долгота места наблюдения; G — Гринвичский меридиан

Расхождение между астрономической и геоцентрической широтами можно определить по формуле

$$(\Phi - \Phi') = \frac{1}{2} 206264,8e^2 \sin 2\Phi,$$

где e — эксцентриситет земного меридиана.

Максимальное расхождение между широтами Φ и Φ' достигает 11,5'. Максимальное расхождение между широтами астрономической и геодезической, т. е. $\Phi - \Phi_1$, не превосходит 3". Это расхождение проявляется в отклонении отвеса от нормали к сфероиду, которое вызывается неравномерным распределением масс в Земле. Разница в 3" между астрономической и геодезической широтами при решении многих задач не играет большой роли. Поэтому для Земли, принимаемой за сфероид или трехосный эллипсоид, астрономическая и геодезическая широты в большинстве случаев отождествляются.

Из наблюдений получается только астрономическая широта, знание которой необходимо астрономам, геодезистам, картографам и не-

которым другим специалистам как для научных, так и для практических целей, например: для изучения движения полюсов по земной поверхности и определения координат мгновенного полюса относительно среднего, вычисления координат небесных объектов по наблюдаемым зенитным расстояниям, для редуccionных вычислений, включающих исправление наблюдаемых координат за рефракцию, приведение светила на видимое место, получение гелиоцентрических координат, приведение светила на среднее место и т. д.

На практике знание широты необходимо мореплавателям и при полетах на дальние расстояния, прокладке железнодорожных магистралей и каналов, сооружении крупных объектов, для уточнения границ между государствами и их внутреннего районирования и для многих других целей.

ИЗМЕНЯЕМОСТЬ ШИРОТ

Начиная примерно со второй половины первого тысячелетия до н. э. и кончая XVIII столетием ученые всего мира стремились выяснить: что же представляет собой Земля, каковы ее размеры и форма. Это было нужно для практики, развития наук, связанных с практикой, например геодезии, географии, картографии и т. д., для которых географические координаты и точность их определения (в особенности широты, которую научились определять значительно раньше, чем долготу) имеют важнейшее значение.

До начала XVIII столетия подозрений, что широта места меняется, насколько известно, не возникало. При всех преобразованиях координат, связанных с определением положения небесных тел, которые производились до Эйлера и долгое время при его жизни, допускалась гипотеза, согласно которой ось вращения Земли считалась неподвижной внутри тела Земли. Такое допущение означало, что широта данного места предполагалась неизменной во времени.

Однако уже были некоторые догадки о том, что полюсы Земли смещаются. Еще Ньютон, рассматривая вращательное движение Земли, пришел к заключению, что полюсы вращения Земли должны перемещаться по ее поверхности. Он даже установил, что в случае вращения Земли по инерции это движение должно быть круговым. Своё рассуждение по этому вопросу Ньютон заканчивает так: «Но, если где-нибудь между полюсом и экватором добавить некоторое новое количество вещества, собранного как бы в виде горы, то оно нарушит правильность движения шара и будет производить перемещение полюсов, которые начнут описывать на поверхности шара круги около первоначального своего места».

В конце XVIII в. Л. Эйлер, опираясь на теорему о моменте количества движения абсолютно твердого тела, получил дифференциаль-

ные уравнения его вращения вокруг неподвижной точки. Эти уравнения Эйлер применил к Земле, считая ее однородным твердым телом, изолированным в пространстве. При этом условии для вращения Земли около ее центра тяжести справедлива теорема Пуансо, утверждающая, что главный момент количества движения не изменяется ни по величине, ни по направлению во все время движения. Рассматривая силы притяжения, действующие на Землю со стороны Луны и Солнца как возмущающие, Эйлер решил эту задачу, в результате чего оказалось, что мгновенный полюс вращения Земли движется по ее поверхности вокруг полюса инерции с периодом 305 звездных суток. Этот период и получил название периода Эйлера.

Но теория даже при правильных исходных положениях не помогла окончательно решить этого вопроса. Она могла дать лишь период изменения широты, а не амплитуду, т. е. размах движения полюса. Величина амплитуды получается только из астрономических наблюдений, которые ничего подобного не давали. Данные же только теории казались маловероятными, ведь в течение 2000 лет считалось, что широта не изменяется. Значит, или место на поверхности Земли изменяет свое положение — материк смещается по отношению к экватору Земли, или сам экватор не занимает неизменного положения. Все это было загадочно и непонятно.

Лишь в последние десятилетия, когда проблема вращения Земли привлекла к себе большее внимание, как в Советском Союзе, так и за рубежом вопрос об изменяемости широт начал выясняться. Дело в том, что Земля не абсолютно твердая и не однородная, как это представлялось ранее, ее форма значительно сложнее шара и вследствие этого под воздействием возмущающих внешних сил, главным образом Луны и Солнца, подвержена непрерывным изменениям. Эти изменения происходят как внутри Земли, так и на ее поверхности и в атмосфере, чем вызывается изменяемость широт (следовательно, и движение земных полюсов) и усложняется ее вращение.

Но вернемся назад и заметим при этом, что работа Эйлера о вращательном движении Земли относительно ее центра тяжести была опубликована спустя семь лет после его смерти, в 1790 г. За 50 лет после выхода в свет этой работы нигде ничего не было сделано для дальнейшего изучения движения полюса. И только в 40-х годах XIX в. с введением в строй Пулковской обсерватории (1839 г.) с ее превосходными и точнейшими инструментами, как говорят, лед тронулся. В 1842 г. начались высокоточные наблюдения на большом вертикальном круге Эртеля с целью получения угла между мгновенной осью вращения Земли и наименьшей осью ее эллипсоида инерции. Результаты не заставили себя долго ждать; была получена величина амплитуды колебания полюса $0,079 \pm 0,014''$. Спустя 30 лет работы повторили на большем материале и для этого угла было най-

дено значение $0,081 \pm 0,014''$, что сходится с первым определением. В течение этих 30 лет было обнаружено, что широта Пулкова подвержена как периодическим, так и вековым изменениям. Аналогичные наблюдения изменения широты были получены в Гринвичской обсерватории и некоторых других.

Предпринимались попытки теоретически решить задачу изменчивости широт. Так, еще в конце XIX в. Д. Ламе предложил гипотезу о том, что изменчивость широт происходит от неодинакового действия рефракции на видимые положения звезд в течение суток и в течение года. По его мнению, гравитационные действия Луны и Солнца на земную атмосферу вызывают приливы и отливы, вследствие которых изменяются толщина и плотность атмосферы. Но все подобного рода гипотезы оказались несостоятельными. Поэтому снова пришлось обратиться к способу, который не терпит необоснованных гипотез, — к наблюдениям, с помощью которых нужно было найти и объяснить причину изменчивости широт на земной поверхности.

В 1883 г. на конгрессе Международной геодезической ассоциации в Риме было предложено одновременно провести наблюдения на двух снабженных одинаковыми инструментами обсерваториях, которые расположены на одной параллели на разных долготах, различающихся примерно на 180° . Полученные ранее расхождения результатов для одних и тех же некоторых постоянных параметров (к примеру, для постоянной годичной абберации), недопустимые с точки зрения астрономической практики, навели передовых ученых того времени на мысль, что, по всей вероятности, в этом повинна широта, так как при обработке наблюдений, какой бы характер они ни носили, широта входит во все формулы. Но с широтой связана ось вращения Земли; так крепко ли она «сидит» в теле Земли и не является ли виной всего происходящего?

Для выяснения этого вопроса на заседании Центрального бюро международных градусных измерений в 1890 г. в Фрейбурге было решено послать экспедицию в Гонолулу на Гавайские острова в Тихом океане и провести одновременные наблюдения, с одной стороны, на обсерваториях Праги и Страсбурга, а с другой — на отстоящих по долготе на 180° от европейских обсерваториях Гонолулу. Такие наблюдения могли решить вопрос о реальности движения оси вращения Земли относительно самой Земли. Экспедицию в Гонолулу направили в конце 1890 г. Там построили павильон, установили инструмент и проводили наблюдения в течение почти двух лет. После обработки полученного ряда наблюдений было установлено, что изменения широты Гонолулу одинаковы по величине, но противоположны по знаку изменениям широты Берлина и Праги (рис. 32). Амплитуда изменений почти одинакова для всех трех ев-

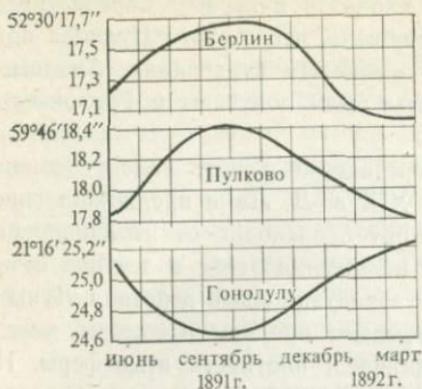


Рис. 32. Изменение широты Гонолулу по амплитуде такое же, как изменение широты Берлина и Пулково, но является зеркальным отображением последнего



Рис. 33. Прецессия, нутация и движение оси вращения в теле Земли

ропейских обсерваторий. Сравнение кривых изменчивости широты привело к выводу о том, что главная часть замеченных изменений широты объясняется действительным движением мгновенного полюса вращения Земли по ее поверхности приблизительно по кругу с диаметром около 15 м в направлении суточного вращения Земли.

Таким образом, получается, что ось вращения Земли имеет три движения: прецессию, нутацию и смещение в теле Земли. В прецессионном и нутационном движении Земля поворачивается вместе с осью мира как одно целое. Кроме этого, она испытывает другое движение, присущее только Земле, но не оси мира. Земля незначительно смещается относительно оси мира. Получается, что ось мира или ось вращения в данный момент занимает в теле Земли не то положение, какое она занимала, например, сутки тому назад, и через сутки будет занимать не то положение, которое занимает в данный момент. Иначе говоря, ось Земли является мгновенной осью вращения. Вследствие этого полюс Земли все время меняет свое положение, описывая кривую на ее поверхности. Нужно твердо уяснить себе, что движение полюсов по поверхности Земли возникает от смещения Земли относительно оси вращения. В то время как земной полюс перемещается по поверхности Земли, направление оси вращения в пространстве изменяется только от прецессии и нутации; другими словами, перемещение земного полюса практически не влияет на положение полюса мира (рис. 33).

РАБОТА СЭТА ЧАНДЛЕРА

В 1892 г. вышла в свет работа американского астронома С. Чандлера, изменившая взгляды на период движения Северного полюса. Как мы уже говорили, Л. Эйлер пришел к выводу, что период движения полюса Земли 305 звездных суток. Чандлер решил проверить этот результат на основании старых наблюдений. Он собрал полученные в течение длительного периода на различных обсерваториях данные, из которых было возможно получить период движения полюса. Это была заманчивая идея, так как по длительным рядам наблюдений можно проследить изменчивость широт на большом интервале времени и выяснить характер явления. В общей сложности Чандлер обработал 45 рядов, полученных в 1837—1891 гг. на 17 обсерваториях: наблюдения проводились девятью методами на 21 различного назначения инструменте.

Детальный анализ всего материала, включающего более 33 тысяч отдельных широт, привел Чандлера к следующим выводам.

1. Наблюденные изменения широт изображаются кривой, которая является результирующей двух периодических кривых, налагающихся одна на другую. Первая из них имеет период в 428 суток, вторая — годичный. Амплитуда первой $0,24''$, амплитуда второй меняется от $0,04$ до $0,20''$.

Свои выводы Чандлер подкрепляет математически: он эмпирически получает общую формулу изменчивости широты, в которой последняя выражается суммой двух членов: первый представляет изменение широты с периодом в 428 сут, второй член — с годовым периодом. Напомним, что по строгой теории, основанной на допущении абсолютной твердости Земли, ее мгновенная ось вращения будет описывать в теле Земли около полярной оси круговой конус. Это движение называется свободной нутацией, а его период, равный 305 сут. — периодом Эйлера. Свободной нутации соответствует равномерное движение мгновенных полюсов по окружности с центрами в полюсах инерции.

Вынужденное годовое движение полюсов вызывается действием на Землю атмосферы и гидросферы. Чандлеровское движение полюса (период 428 сут) — тоже свободная нутация, эквивалент эйлеровского движения полюса для случая упругой Земли.

Причиной чандлеровского колебания полюса являются перемещения масс внутри Земли, изменяющие ориентировку эллипсоида инерции. Приуроченность колебаний к конкретным перемещениям масс не установлена. Перемещения могут быть в ядре, мантии, земной коре и атмосфере (циклоны и антициклоны); происходят они

постоянно, но не регулярно: могут как увеличивать, так и уменьшать продолжительность периода колебаний. Он лежит в интервале 1,19—1,21 года и представляет собой затухающий процесс. По современным наблюдениям за 70 лет (1900—1970) период Чандлера равен 429,16 сут. Это движение возникает, когда ось вращения отклоняется по какой-либо причине от оси наибольшего момента инерции Земли. Однако оно должно затухать во времени, так как энергия свободного движения полюсов в теле Земли превращается в тепло. Отсутствие затухания свободного движения полюсов указывает на то, что имеются какие-то процессы, непрерывно его поддерживающие. К таким процессам относят землетрясения, электромагнитное взаимодействие ядра и мантии Земли, лунно-солнечную прецессию и т. д. Наиболее вероятно, что свободное поведение полюсов поддерживается постоянно протекающими гидрометеорологическими процессами. Период незатухающего движения зависит от динамического сжатия и упругих свойств Земли.

Что касается разной продолжительности периодов Эйлера и Чандлера, то с 1892 г. выдающиеся ученые всех континентов пытались решить эту задачу, но успеха не имели. И лишь С. Ньюком, отступивший от всеми принятой догмы, что Земля абсолютно твердое тело, и принявший ее за тело деформируемое, да еще покрытое водой, исходя из численной оценки движения и смещения воды в океанах, показал, что расхождение между периодами Эйлера и Чандлера происходит оттого, что Земля не абсолютно твердое (как полагал Эйлер), а упругое, подверженное деформациям тело (только под действием возмущающих приливных сил со стороны Луны и Солнца Земля растягивается примерно на 60 см).

Таким образом, после выдающихся исследований Эйлера, Кюстнера, Нюрена, Чандлера, Ньюкома и др. стало ясно, что ось вращения Земли не занимает неизменного положения в теле Земли, а смещается. В результате этого явления периодически смещается экватор Земли, изменяются широты и происходит движение полюсов по поверхности Земли.

ФОРМУЛА С. К. КОСТИНСКОГО

Нужно было как-то связать в одно целое все эти явления, что и сделал пулковский астроном С. К. Костинский. Раз широта места периодически изменяется в ту или другую сторону, то можно взять за отрезок времени (например, за год) ее среднее значение. С. К. Костинский в своей выдающейся работе сделал только одно допущение, а именно: средние значения широт для всех мест земной поверхности определяют одну и ту же точку — среднее положение полюса Земли. Заметим, что этим самым С. К. Костинский отвечает на очень

важный вопрос — что считать средним полюсом.

Он допустил, что в данный момент существуют два полюса: P_0 — среднее положение полюса и на расстоянии r от него P — положение истинного полюса в данный момент, т. е. положение мгновенного полюса. Через место на поверхности Земли A , имеющее западную долготу λ , можно провести два меридиана: средний и истинный. Если направить ось x по Гринвичскому меридиану P_0G , ось y к западу от него, а угол между направлениями x и r обозначить через ω , то, применяя к треугольнику AP_0P формулу для узкого сферического треугольника (рис. 34) $(c-b) = a \cos \beta$, получим

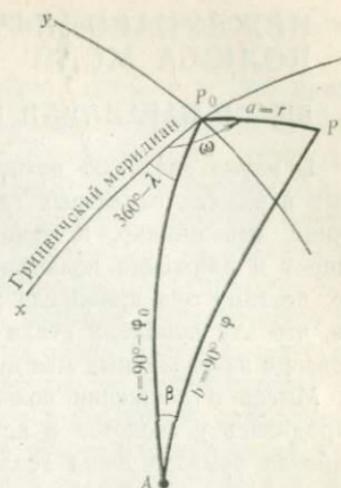


Рис. 34. К выводу формулы С. К. Костинского

$$90^\circ - \varphi_0 - 90^\circ + \varphi = r \cos [\omega - (360^\circ - \lambda)]$$

или

$$\varphi - \varphi_0 = r \cos (\lambda + \omega).$$

Если $r \cos \varphi = x$ и $r \sin \varphi = y$, то получим формулу

$$\varphi - \varphi_0 = x \cos \lambda + y \sin \lambda,$$

в которой x и y — координаты мгновенного полюса относительно его среднего положения, т. е. среднего полюса, φ_0 — среднее значение широты. Это и есть формула С. К. Костинского, в которой два неизвестных — x и y ; чтобы определить их, нужно иметь два уравнения, а для этого следует наблюдать за изменяемостью широт по крайней мере в двух пунктах. Задача лучше всего решается при разности долгот этих пунктов 90° .

Изменения широт вследствие движения полюсов Земли по ее поверхности или вследствие смещения оси вращения в теле самой Земли названы полярными.

Таким образом, трудами выдающихся ученых последней четверти XIX столетия была подготовлена почва для создания специальной службы по изучению изменяемости широт мест и движению полюсов по поверхности Земли.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СЛУЖБА ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА МСДП¹

ВЫБОР ПАРАЛЛЕЛИ И ОРГАНИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

В науке зачастую возникают проблемы, полное решение которых в рамках отдельных государств, независимо от их размеров и мощи, невозможно. К таким и относится проблема изменчивости широт и движения полюсов. В ней заинтересовано все человечество, поэтому она приобрела международный характер. И не случайно, что эту проблему стали рассматривать в самом начале возникновения на различных международных форумах.

Мысль о движении полюсов Земли по ее поверхности впервые зародилась у геологов и климатологов. При раскопках в северных районах земного шара геологи находили останки или следы флоры и фауны, свойственные в нашу эпоху тропической зоне. Для выяснения этого явления выдвигались различного рода предположения, гипотезы, в том числе и о движении земных полюсов. Некоторые климатологи считали, что различного рода похолодания (ледниковые периоды) связаны также с движением полюсов. Но эти необоснованные догадки, не подтвержденные научными наблюдениями, успеха не имели и ушли в прошлое².

Научно обоснованное изучение проблемы началось с С. Ньюкома и в большей степени — с Л. Эйлера, который получил уже практический результат.

После Эйлера этот вопрос был поставлен итальянцами Ферголой и Скиапарелли на Международном геодезическом конгрессе в Риме, а 1883 г., где речь шла об изучении векового движения полюсов, происходящего под влиянием геологических причин, но дальнейшего развития эти идеи в то время не получили. Однако многих интересовало, на самом ли деле полюсы Земли движутся или это только предположения? Нужно заметить, что работа американского астронома С. Чандлера, в которой было установлено, что изменения широты могут быть представлены с удовлетворительной для того времени точностью суммой двух составляющих с периодами 1 и 1,2 года, направила интерес и усилия астрономов только на изучение периодических колебаний широты. Первоначальная идея Ферголы и Скиапарелли о вековом движении полюсов была почти забыта. Программа же, разработанная Гельмертом и Альбрехтом, не обеспечивала получения материала, который позволил бы судить о характере медленных изменений широты; вследствие

¹ С 1898 до 1961 г. была Международная служба широты (МСШ).

² Однако и в наше время этим вопросом стали заниматься некоторые ученые, изучающие древнюю историю Земли, получая материал по палеомагнитным, палеонтологическим и палеоклиматическим данным.

этого нельзя было решить, существует ли вековое перемещение полюсов или нет.

Ученые вернулись к обсуждению этого вопроса в 1895 г. на XI Международной геодезической конференции в Берлине, где было сделано обоснованное предложение об организации специальной службы для получения в определенных местах наблюдательных материалов, позволяющих подробно изучить движение полюсов Земли и их поведение в будущем. Почему же полюсы Земли привлекли к себе такое пристальное внимание? По-видимому, потому, что знание их поведения имеет большое теоретическое и практическое значение. Одной из основных задач того времени стала задача всестороннего изучения широты, ее периодических и медленных (вековых) изменений, получения некоторых астрономических постоянных, в частности годичной аберрации, потоянной нутации, и изучения движения оси вращения в пространстве и в теле Земли. Наблюдения широт и их изменений должны были давать материал для разного рода астрономических и геофизических исследований. При смещении (колебании) Земли относительно оси вращения меняет направление в пространстве отвесная линия, а следовательно, смещаются зенит места наблюдения и небесный меридиан. Поэтому движение земных полюсов вызывает изменение географических координат на земной поверхности и влияет на результаты определения точного времени. С точным временем связаны определения прямых восхождений светил, долгот мест на земной поверхности и другие астрономические задачи. Значит, точные астрономические наблюдения нужно исправлять, учитывая движение полюсов.

Всесторонним изучением движения полюсов Земли занимается не только астрометрия, но и другие науки, как, например, геодезия, геофизика, картография и т. п. Последняя, как известно, занимается составлением географических карт на которых все объекты привязываются к полюсу, и чем точнее мы будем знать его положение и поведение, тем лучше будут результаты. Но составить карту земной поверхности или части ее с указанием взаимного расположения отдельных объектов возможно только при условии, что известны средние широты и долготы некоторого числа астрономо-геодезических пунктов, наносимых на карту, для которых известны широта, долгота и азимут. Из наблюдений же получаются мгновенные координаты, т. е. координаты для моментов наблюдений. Для перехода от мгновенных координат к средним нужно знать, как смещается полюс по поверхности Земли.

Кроме того, изучение движения полюсов Земли дает важные сведения для суждения о внутреннем строении Земли, смещении материков, необходимые для геофизики и космогонии. Поэтому

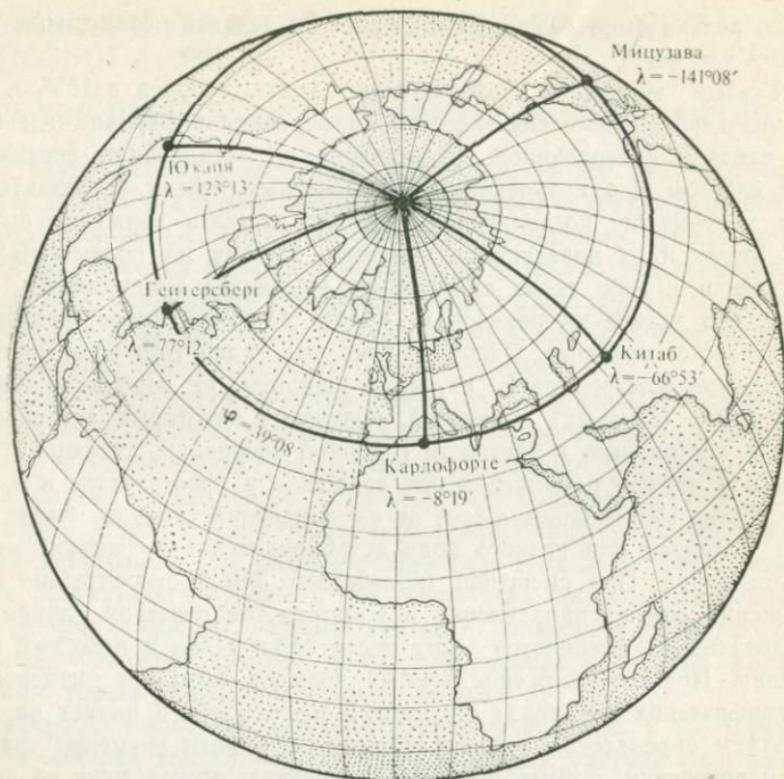


Рис. 35. Схема расположения станций МСШ

становится ясно, почему вопрос о движении полюсов приобрел такое важное значение.

Работа XI конференции проходила очень оперативно. Ее участники организовали Центральное бюро с большими полномочиями, которое должно было решать вопросы, связанные с выбором места для строительства наблюдательных станций, разработки программы наблюдений одних и тех же звезд для всех станций, а также конструкций специально приспособленного для этих целей инструмента, однотипных павильонов для инструментов и т. п. Срок работы Центрального бюро установили в три года.

Работа началась с того, что было обследовано и изучено по имеющимся опубликованным материалам много районов умеренного пояса земного шара с точки зрения единообразия климата, количества ясных ночей, годовых осадков, атмосферного давления и т. д. На основании этих данных в 1896 г. на Лозаннской конференции для строительства станций был предложен ряд пунктов, лежащих на параллели $39^{\circ}8'$. Эта параллель проходит по ряду государств, в том числе и по южным районам России. Удобными и

отвечающими требованиям признали следующие места: Мицузава (Япония), Карлофорте (Италия), Гейтерсберг и Юкайя (США).

После трехлетнего периода работы Центрального бюро и тщательного обсуждения его доклада на XII Международной геодезической конференции в Штутгарте в 1898 г. работу Центрального бюро одобрили и приняли решение соорудить четыре широтные станции в предложенных Центральным бюро пунктах (рис. 35).

ШИРОТНАЯ СТАНЦИЯ В ЧАРДЖУЕ

Для обработки большого количества наблюдений решили воспользоваться методом, разработанным американским геодезистом Талькоттом. Сущность этого метода заключается в следующем: как известно, склонение δ звезды, кульминирующей в зените, равно широте φ места наблюдения. Полусумма склонений двух звезд (S и N) кульминирующих на одинаковом зенитном расстоянии к югу и северу от зенита, также равна широте места: $(\delta_S + \delta_N)/2 = \varphi$. Невозможно подобрать две такие звезды с совершенно одинаковыми зенитными расстояниями в меридиане. Однако можно набрать значительное количество пар звезд с зенитными расстояниями в меридиане, незначительно отличающимися друг от друга (на $10-15'$), и с близкими кульминациями.

Из наблюдений таких двух звезд (пары) широта вычисляется по формуле

$$\varphi = \frac{1}{2} (\delta_S + \delta_N) + \frac{1}{2} (z_S + z_N),$$

где δ_S, z_S — склонение и зенитное расстояние звезды, кульминирующей к югу от зенита; δ_N, z_N — склонение и зенитное расстояние звезды, кульминирующей к северу от зенита. Разность $z_S - z_N$ зенитных расстояний двух звезд измеряется микрометром; нить микрометра наводится на первую кульминирующую звезду, затем инструмент поворачивается вокруг вертикальной оси на 180° и наводится на вторую звезду. Разность отсчетов микрометра дает разность зенитных расстояний звезд; эта разность исправляется за рефракцию, вычисленную по особым таблицам.

При наблюдении пары звезд труба инструмента не вращается около горизонтальной оси; для учета ошибок нивелировки производятся отсчеты уровня, жестко скрепленного на время наблюдения пары с самой трубкой. Склонения звезд δ_S и δ_N берутся из астрономических календарей.

Для наблюдения звездных пар по способу Талькотта сконструированы и выпускаются в некоторых государствах, в том числе и в СССР, специальные инструменты на горизонтальной установке, так

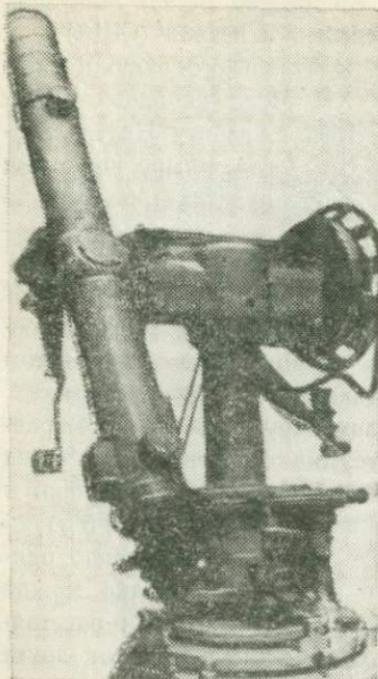


Рис. 36. Зенит-телескоп ЗТЛ-180 (ленинградский, диаметр объектива 180 мм)

называемые зенит-телескопы. У нас они установлены в обсерваториях Пулковы, Москвы, Полтавы и др. Как показала практика, советские зенит-телескопы среди инструментов такого типа являются лучшими как по масштабам, так и по получаемым результатам (рис. 36).

При вычислении координат движения полюса из наблюдений пользуются формулой пулковского астронома С. К. Костинского, связывающей координаты полюса с мгновенной и средней широтой, полученной им еще в 1892 г. (Другого математического аппарата для этой операции нет.) Для получения высококачественного материала — координат x и y по формуле Костинского необходимо равномерно распределить наблюдательные станции на параллели. Если имеются две станции, то они должны отстоять одна от другой на 90° , если 3, то на 120° , 4 — на 90° , 5 — на 72° .

Расстояние по долготе между станциями Карлофорте и Мицузава равнялось $132,9^\circ$, что не отвечало требованиям формулы Костинского. Этот интервал охватывал часть параллели $39^\circ 8'$, проходящей по Средней Азии России. К сожалению, русские представители науки не были приглашены ни на одну из предшествующих конференций и лишь на вышеупомянутой XII Международной геодезической конференции присутствовал русский представитель — начальник Военно-топографического отдела Генерального штаба русской армии генерал О. Э. Штубендорф. На заседании 5 октября 1898 г. он заявил, что разрыв $132,9^\circ$ между станциями Карлофорте и Мицузава недопустим, и русское правительство берется соорудить одну широтную станцию, которая будет вести работу по общей программе. Место для станции было выбрано в 9,5 км от г. Чарджуя (теперь г. Чарджуу Туркменской ССР), расположенного на международной параллели $39^\circ 8'$. У Хивинской железной дороги в 3 км от левого берега Амударьи (рис. 37). Работа по постройке станции началась и закончилась в 1899 г. Сооружение

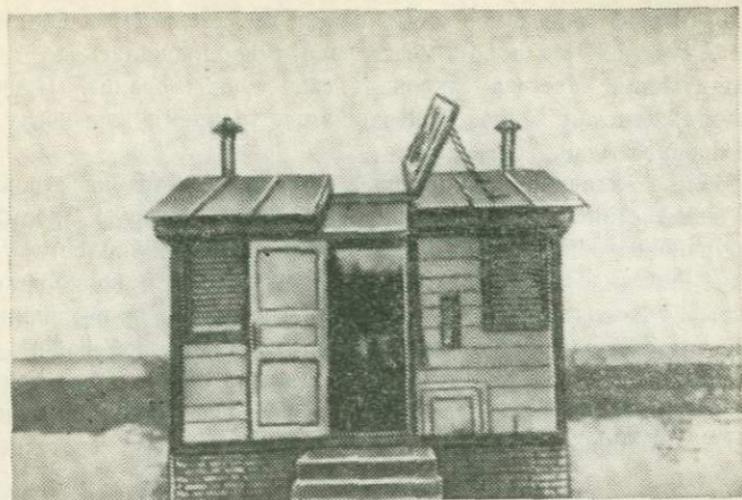


Рис. 37. Павильон широтной станции в Чарджуе

станции производилось под руководством и на средства Генерального штаба русской армии, которому нужны были географические координаты этой местности для составления военных карт. Непосредственное руководство всей работой по созданию станции было возложено на полковника Генерального штаба русской армии Д. Д. Геденова. Случайно оказавшаяся на этой параллели обсерватория в Цинциннати (США) изъявила согласие принять участие в столь интересной работе.

Так образовался коллектив из шести однотипных астрономических учреждений для изучения изменчивости широт. Во всех пунктах были построены почти одинаковые павильоны для инструментов и установлены почти одинаковые инструменты (четыре совершенно одинаковых зенит-телескопа). Была составлена программа наблюдений за 96 звездными парами; наблюдения на всех станциях начались в 1899 г. и в основном продолжаются до настоящего времени. Получено около миллиона наблюдений звездных пар — ценнейший уникальный наблюдательный материал, который ждет общей обработки современными вычислительными средствами для получения окончательных результатов (предварительные результаты получены во время работы). Разумеется, в течение такого длительного периода наблюдений были и неполадки, и недоразумения.

Так, случилось несчастье с нашей широтной станцией в Чарджуе. Оказалось, что Амударья, как и большинство рек Средней Азии, часто меняет свое русло. В 1908 г. она быстро стала приближаться к станции и летом 1909 г. станцию пришлось снять

(прекратить наблюдения и снять павильон) и перенести на правый берег Амударьи. На новом месте работа продолжалась до 1919 г. Затем станция навсегда закончила свое существование. Причиной была гражданская война, бушевавшая в то время во многих районах Средней Азии.

В 1928 г. наше правительство выделило средства на строительство новой станции (взамен разрушенной), которую построили около районного центра Китаб в Кашкадарьинской области Узбекской ССР. Она начала работу 14 ноября 1930 г. и продолжает ее непрерывно до настоящего времени, обогатившись за последние годы новым оборудованием. Во время второй мировой войны были перерывы в работе и на других станциях, но после войны успешно перерывы в работе на других станциях, но после войны успешно работают станции Мицузава, Китаб, Карлофорте, Гейтерсберг и Юкайя.

НАБЛЮДЕНИЯ УТОЧНЯЮТ ТЕОРИЮ

Разумеется, заранее никто не мог сказать, как пойдет работа, какие встретятся непредусмотренные трудности и неполадки. Например, обрабатывая первый шестилетний ряд широтных наблюдений, японский астроном Кимура установил, что вычисленные координаты полюса неудовлетворительно согласуются с наблюдаемыми координатами отдельных станций и что формула Костинского дает лучшую сходимость результатов, если в ее правую часть включить еще один член, одинаковый для всех станций, независимый от их координат, получивший название зет-члена (z). Заметим, что допущение одинаковости этого члена для всех станций не подтверждается ни наблюдениями, ни теоретическими соображениями.

В формулу Костинского входит средняя широта ϕ_0 , которую нужно определить, чтобы вычислить координаты полюса x , y . Международная служба широты вычисляла среднюю широту ϕ_0 путем усреднения мгновенных широт за шестилетний период, так как в него укладываются шесть раз годовой и пять раз чандлеровский периоды; они полагали, что из такого усредненного значения исключаются все полярные волны. Это было бы верно, если бы полученные из наблюдений широты содержали только случайные погрешности наблюдений и вычислений; среднюю широту можно было бы определять как среднее арифметическое для какого угодно интервала времени.

Этот простейший способ вычисления средней широты, используемый МСШ, не вполне удовлетворителен хотя бы потому, что за шесть лет наблюдений получается лишь одно значение широты. И если в первом шестилетии была какая-нибудь неточность, то она усугублялась в следующем периоде наблюдений.

ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСОВ В РОССИИ

Пионерские работы в Пулкове, Москве и Казани

Широтные наблюдения в России начались в прошлом веке, но они имели эпизодический характер и использовались для выполнения научной работы обсерваторий и отдельных ученых. Такие наблюдения начиная с 40-х годов прошлого столетия велись в Пулковской обсерватории. Они выполнялись на большом вертикальном круге Эртеля, на большом пассажном инструменте Репсольда, установленном в первом вертикале, а с 1904 г. — на большом зенитном телескопе, сделанном в мастерской Пулковской обсерватории механиком Г. А. Фрейбергом-Кондратьевым.

Одновременно определяли широту в Московской обсерватории на Пресне. Наблюдения проводились на переносном пассажном инструменте Эртеля в первом вертикале и на пассажном инструменте Бамберга, установленном сначала в меридиане, а затем в первом вертикале. На последнем инструменте астрономические наблюдения с 1892 по 1895 г. проводил П. К. Штернберг.

В обсерватории Казанского университета с 1892 по 1911 г. был проведен девятилетний непрерывный ряд наблюдений для изучения изменений широты, данные которых использованы в 1912 г. М. А. Грачевым для определения постоянной годичной аберрации.

В г. Ташкенте в 1895—1896 гг. полковник Генерального штаба русской армии Д. Д. Геденов исследовал изменения широты этого города.

Все эти широтные определения имели большое научное значение, но не имели общего плана и единой цели.

Исследования советских ученых

После Великой Октябрьской социалистической революции в конце 20-х годов украинские астрономы во главе с А. Я. Орловым предложили организовать на параллели $49^{\circ}36'$ три широтные станции, наблюдения на которых обеспечили бы получение координат Северного полюса для нужд астрономии. Параллель $49^{\circ}36'$ выбрали потому, что на ней в то время кульминировали в зените две-три яркие звезды.

Одна из обсерваторий была организована в 1926 г. в Полтаве, где и начались наблюдения на зенит-телескопе Цейсса двух зенитных звезд — α Персея и η Большой Медведицы. Эти звезды настолько яркие (вторая звездная величина), что их можно наблюдать в течение всего года ночью и днем. Интервал между наблюдениями обеих звезд 10 ч 25 мин, что очень выгодно, поскольку получаемые широты относятся к разным моментам суток.

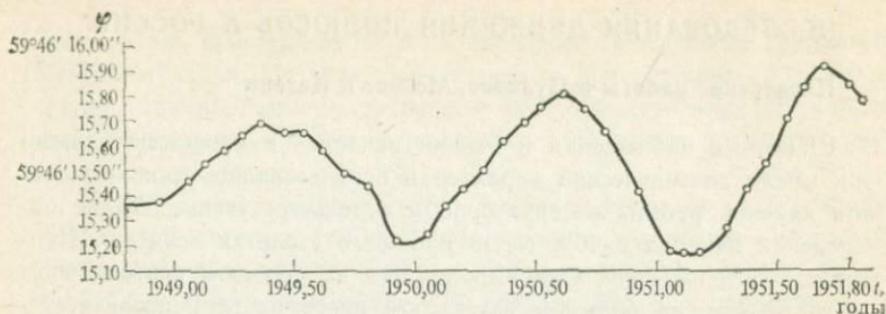


Рис. 38. Изменения широты Пулковской обсерватории за 3 года

К началу 30-х годов была построена и в ноябре 1930 г. вступила в строй действующих входящая в Международную службу широты Китабская широтная станция, которая работает и в настоящее время.

Изучение движения полюсов и вращения Земли активизировалось после окончания второй мировой войны (со второй половины 40-х годов и позднее). Этому способствовали материальная база (восстановление и модернизация старых обсерваторий и строительство новых), а также организация и строительство различного рода специализированных промышленных объектов, изготовляющих новое астрономическое оборудование.

В начале 50-х годов вступила в строй почти заново построенная Пулковская обсерватория, в которой развернул наблюдения и научные исследования на двух зенит-телескопах широтный отдел обсерватории. Результаты этой работы не заставили себя долго ждать. Была получена кривая изменения широты Пулкова за три года (21/X 1948—12/XI 1951), иллюстрирующая поведение широты обсерватории (рис. 38).

Построена новая специализированная по широтной проблеме обсерватория АН Украинской ССР в Голосееве (вблизи Киева), являющаяся в настоящее время крупнейшим научным учреждением Советского Союза.

В ряде обсерваторий страны организованы новые отделы, снабженные новейшей современной как наблюдательной, так и вычислительной аппаратурой. Так, в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга при Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова появился широтный отдел, оснащенный зенит-телескопом ЗТЛ-180. Кривая изменения широты Московской обсерватории на Ленинских горах с 1958 по 1963 гг. приводится на рис. 39.

Наряду с работами практического характера в это же время развернулись теоретические исследования, под руководством А. Я. Ор-

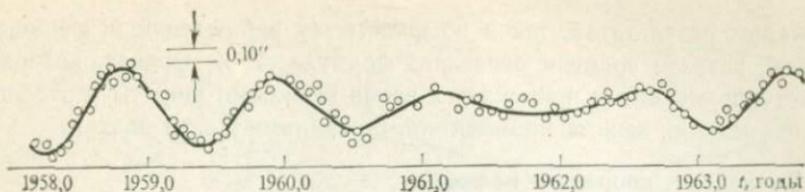


Рис. 39. Изменения широты Московской обсерватории за 5 лет

лова. Он впервые обратил внимание на среднюю широту и дал метод ее получения, обосновал ряд положений проблемы и вручную вычислил координаты полюса на многие годы.

Средняя широта. Метод А. Я. Орлова

Сущность метода А. Я. Орлова состоит в том, что для промежутков времени около полутора лет законы изменения широты можно выразить с достаточной для определения средней широты точностью суммой двух гармонических составляющих с периодами 1 и 1,2 года. Тогда можно вычислить среднюю широту для момента $t+7,5$ по следующей формуле

$$\varphi_0 = \frac{1}{20} \sum_{t=0}^4 (\varphi_t + \varphi_{t+5} + \varphi_{t+6} + \varphi_{t+11}),$$

в которой φ_t дана для каждой десятой доли года (36,5 сут), t выражено в десятых долях года.

Формула составлена так, что изменения средней широты с периодами в полгода, год и 1,2 года исключаются. Действительно, полу-

сумма $\frac{1}{2}(\varphi_t + \varphi_{t+5}) = U_t$ не содержит годовой волны, а в полусум-

ме $\frac{1}{2}(U_t + U_{t+6}) = w_t$ нет чандлеровской волны с периодом 1,2

года. Чтобы получить из ряда наблюдений среднюю широту φ_0 , нужно взять среднее из пяти последовательных значений суммы

$\varphi_t + \varphi_{t+5} + \varphi_{t+6} + \varphi_{t+11}$, тогда исключится и полугодовая волна, если таковая существует. Для получения одной средней широты нуж-

но использовать 16 последовательных значений $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{15}$. Чтобы получить следующее значение для момента $\varphi_0 = 8,5$ года, нужно сместиться на 0,1 года вперед.

Существуют и другие методы определения средней широты, например по формуле бельгийского геофизика П. Мельхиора, но, как показала практика, наиболее удовлетворительной как по точности по-

лучаемых результатов, так и по количеству наблюдений и, следовательно, затрате времени оказалась формула А. Я. Орлова, которая в настоящее время и применяется всеми службами широты и отдельными учеными, занимающимися исследованиями в этой области.

Вычисление координат полюса

При вычислении средних широт станций для вывода координат полюса x и y используют формулу Костинского с добавлением к ее правой части одного члена (z -члена), одинакового для всех широтных станций и не зависящего от их координат.

Но координаты x и y нужно приводить к какому-то неподвижному полюсу. Советские специалисты предпочитают пользоваться средним полюсом, предложенным А. Я. Орловым (*средний полюс эпохи* — такое положение полюса, каким оно было бы для этой эпохи при отсутствии его периодического движения). Согласно методу Орлова, исследователям, прежде чем вычислить координаты полюса x и y , необходимо из всех широт исключить неполярные изменения широты. Метод Орлова был со всей тщательностью исследован и применен украинскими астрономами для вывода по всем широтным наблюдениям координат полюса с 1890 по 1969 г.

Целью их работы, в первую очередь, было повысить точность определения координат полюса, которые в течение десятилетий определялись по разрозненным широтным наблюдениям, ослабить некоторые ошибки наблюдательного характера числом наблюдений. Кроме этого точность определения координат x и y должна была повыситься при обработке материала более строгими методами, разработанными в современной математической статистике.

Ученые предварительно провели оценку точности различных рядов наблюдений, чему предшествовал теоретический анализ способов определения среднего полюса. Всего было обработано 125 рядов наблюдений, полученных на 98 самых различных инструментах на 73 обсерваториях земного шара.

Проведенная громадная работа убедительно показала, что средний полюс эпохи, рекомендуемый Орловым, более всего подходит в качестве нуль-пункта; при этом оказалось, что положение полюса сильно зависит от числа и расположения определяющих станций.

Есть и другие способы определения координат полюса, в частности, по наблюдениям искусственных спутников Земли (ИСЗ), по доплеровским наблюдениям ИСЗ и т. п.

Неполярные изменения широты

А. Я. Орлов открыл также неполярные изменения широты, которые происходят не от смещения оси в теле Земли, а по другим причинам, зачастую нам неизвестным, в основном из-за изменений

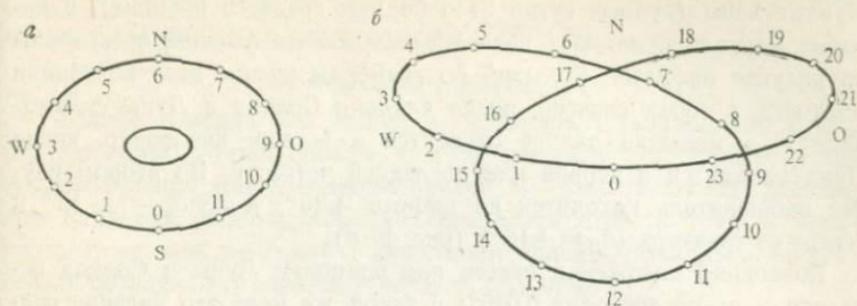


Рис. 40. Эллипсы, вычерчиваемые концом отвеса под действием притяжения Луны и Солнца:

a — Луна находится на небесном экваторе, наблюдатель — на земном; *б* — наблюдатель находится на широте $+30^\circ$, склонение Луны $\delta = +15^\circ$

направления отвесной линии в данном месте. Некоторые изменения широты в свою очередь делятся на периодические и непериодические.

К периодическим неполярным относятся изменения широты, происходящие от уклонения отвеса (так называемые годовой и суточный члены). К непериодическим неполярным относятся медленные изменения средней широты и неправильные изменения, из-за которых широта, например, в течение 0,2; 0,3; 0,4 года может иметь завышенное или заниженное значение. Рассматривая неполярные факторы изменения широты, особое внимание следует обратить на уклонение отвеса, так как широта — угол между отвесной линией и плоскостью земного экватора. Особенно влияет на положение нити или грузика притяжение Луны и Солнца. Равнодействующая этих сил называется приливообразующей. Она разлагается на две составляющие: одна из них действует в горизонтальном направлении, другая — вдоль отвеса. Широта изменяется только от действия горизонтальной составляющей. Так как Солнце и Луна меняют свои положения по отношению к Земле, то и отвесная линия будет смещаться в различных направлениях, а значит, будет изменяться и астрономическая широта места наблюдения. Наибольшее изменение произойдет во время новолуния, когда силы со стороны Солнца и Луны действуют в одном направлении.

Кривая на поверхности Земли, которую вычерчивает конец отвеса под действием притяжения Луны и Солнца, очень сложна. Форма ее зависит от положения Луны, Солнца и наблюдателя на Земле. Для примера приведем два варианта кривых. В первом случае Луна находится в плоскости небесного экватора, а наблюдатель на земном экваторе (рис. 40, *a*). Путь маятника — простой эллипс; маятник должен пройти его дважды в течение одних суток.

Лунные часы (лунные сутки 24 ч 50 мин среднего времени), в которые маятник принимает последовательные положения, обозначены на рисунке цифрами. Большой по размерам эллипс дает колебания маятника в эпохи сизигий, когда влияния Солнца и Луны складываются, а меньший эллипс относится к эпохам квадратур, когда Луна находится в первой или последней четверти. Во втором случае наблюдатель находится на широте $+30^\circ$; а Луна — на 15° к северу от экватора ($\delta_L = +15^\circ$) (рис. 40, б).

Колебания положения отвеса под влиянием Луны и Солнца невелики и не превосходят $0,025''$; в такой же мере это явление называется и на изменяемости широт. Однако широты изменяются и под действием факторов, о которых мы зачастую ничего не знаем.

Неполярные изменения широты представляют собою суммарную составляющую, в которую входят годовая и полугодовая члены, зависящие от годовых метеорологических условий, ошибки склонений звезд, собственных движений, параллаксов, астрономических постоянных и даже суточный член, по поводу существования которого есть разные мнения. (По этому вопросу опубликовано много работ как в СССР, так и за рубежом. Единого мнения о наличии суточного члена нет).

Дело в том, что астрономический инструмент сделан из обычных материалов, как правило, из металла. На него влияют метеорологические условия, которые в период наблюдений существенно меняются, что, безусловно, сказывается на результатах. Они зачастую незначительно расходятся. Эти расхождения можно приписать как инструменту, так и столбу, на котором он установлен, и даже павильону, в котором происходят наблюдения. Опытные наблюдатели хорошо это знают и небольшие изменения в широте в течение периода наблюдений (как правило, одной ночи) относят к суточному члену. (На полтавской обсерватории суточный член из наблюдений не получают.)

Все изложенное относительно суточного члена можно заменить одной фразой С. К. Костинского: «При любых способах определения широты различные причины, как-то: инструментального характера, изменчивость рефракции, температуры и т. д. производят в наблюдениях небольшие систематические ошибки с суточными и годовым периодами».

УТОЧНЕНИЕ ФОРМУЛЫ С. К. КОСТИНСКОГО

После первых двух лет работы Международной службы широты японский астроном Кимура объявил, что на всех станциях наблюдается почти одно и то же изменение широты с годовым периодом, не зависящим от движения полюса, названное, как мы уже сказали,

z-членом. Таким образом, двучленную формулу С. К. Костинского нужно было дополнить z-членом и принять в таком виде:

$$\Delta\varphi = x \cos \lambda + y \sin \lambda + z.$$

Позднее, в конце 20-х годов, А. Я. Орлов установил, что кроме периодического «неполярного», т. е. не зависящего от движения полюса изменения (обозначенного буквой z), существуют еще медленные вариации широты, которые приходится отнести тоже к неполярным, так как их связи с движением полюса установить не удалось. Обозначив эти вариации через ψ , получим

$$\Delta\varphi = x \cos \lambda + y \sin \lambda + z + \psi.$$

В то время как z-член для всех международных станций приблизительно один и тот же, изменения ψ совершенно разные.

При определении координат полюса неполярные изменения ψ исключаются по методу Орлова из всех широт, иначе говоря, x и y вычисляются только по отклонениям мгновенной широты от средней. Тогда они будут освобождены от таких изменений широты, которые зависят не от движения полюса, а от каких-то других причин.

ВЕКОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ

Давным-давно высказывалось мнение, что полюсы Земли когда-то находились в нынешней экваториальной области. Эта мысль и в наши дни культивируется учеными, занимающимися палеонтологией, палеомагнитологией и палеоклиматологией.

Палеонтологический метод изучения движения полюсов опирается на исследование ископаемых тропической флоры и фауны в местах, находящихся в полярных областях и районах вечной мерзлоты; палеомагнитным методом движение полюса определяется по остаточному магнетизму различных горных пород; палеоклиматический метод пытается объяснить эпохи похолоданий изменением положения земной оси.

Точные наблюдения за движением полюса по земной поверхности проводятся по астрономическим наблюдениям звезд: они начались только в последнее столетие. Еще в 1890 г. американский астроном Дж. Комсток заметил прогрессивное уменьшение широты с течением времени в Пулкове, Гринвиче, Париже, Милане, Риме, Неаполе и, напротив, увеличение широты в Америке и попытался найти числовой закон прогрессивного движения полюса по земной поверхности. Используя для этой цели старые наблюдения, он пришел к заключению, что земной полюс движется со скоростью 1,4 м в год (0,44" в угловой мере) по направлению меридиана, находящегося на 69° к западу от Гринвича. Этот вывод, как мы увидим дальше, близок к истине, но значение полученной скорости по мень-

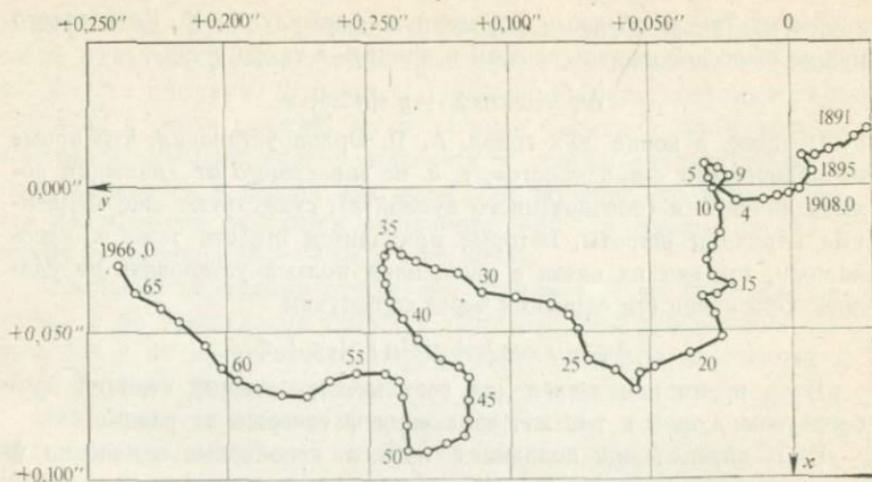


Рис. 41. Вековое движение полюса по данным МСДП

шей мере на порядок ошибочно. С. Чандлер, критикуя работу Комстока, говорил, что большую часть замеченных вековых изменений широты можно объяснить ее периодическими изменениями в эпоху наблюдений и ошибками старых наблюдений и редуций.

Вековое движение полюса изучалось также японскими учеными Т. Хаттори и Н. Секигути, но их результаты не внушали особого доверия.

Из всех работ по определению векового движения полюса наиболее аккуратной в методическом отношении является работа А. Я. Орлова, вышедшая в 1954 г. В этой работе он приводит результаты обработки наблюдений МСШ за 51 год на трех широтных станциях — Мицузава, Карлофорте и Юкайя. В общей сложности на этих станциях проведено 258 672 наблюдения звездных пар. Из полученного материала следует, что полюс Земли имеет вековое движение со скоростью $0,004''$ в год вдоль меридиана, расположенного на 69° к западу от Гринвича. Результаты, полученные по наблюдениям Международной службы широты и Международной службы движения полюса за последние 100 лет, показали, что скорость движения полюса равна $0,302''$ в столетие и происходит в направлении 72° к западу. Это значение мало отличается от результатов, полученных А. Я. Орловым. В общем астрономические наблюдения за последнее столетие показывают, что Северный полюс Земли смещается по сложной кривой (рис. 41) в направлении $70\text{--}75^\circ$ западной долготы.

Интересное исследование проведено академиком А. А. Михайловым в 1970 г. Допуская, что вековое движение полюса происхо-

дит не из-за изменения направления земной оси, а вследствие сдвига земной коры по подстилающей ее вязкой массе относительно оси, он приходит к заключению, что полюс движется в направлении 83° западной долготы. Это хорошо согласуется с приведенными выше результатами. Если предположить, что вековое движение среднего полюса постоянно как по величине, так и по направлению и равно $0,3-0,4''$ в столетие, что вытекает из исследований многих ученых, то Северный полюс Земли примерно через 60 млн. лет будет вблизи Вашингтона. При этом экватор Земли приблизится к Москве примерно на 40° и она будет в таких же климатических условиях, как, например, Йемен или северная часть Эфиопии.

НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ РАБОТЫ МСШ ЗА 80 ЛЕТ

Что же дала науке и производству международная кооперация ученых, получившая еще на XII Международной геофизической конференции название «Международная служба широты» (МСШ)? За 80 лет существования МСШ в ее работе принимали участие многие выдающиеся ученые мира, сотни высококвалифицированных наблюдателей, армия вычислителей, вспомогательного и обслуживающего персонала, а результат? Вот он!

Получено около миллиона наблюдений широт; все они печатаются в отдельных изданиях МСШ, а теперь — МСДП. Это уникальные высокоточные наблюдения, которые уже использовались многими учеными и учреждениями не только для изучения изменчивости широт и движения полюсов Земли, но и для других целей астрономии, в частности определения астрономических постоянных — годичной аберрации света и постоянной нутации.

Установлено, что движение полюса состоит из двух составляющих — периодической и вековой. В периодическом движении мгновенный полюс Земли перемещается по земной поверхности вокруг среднего полюса в направлении вращения Земли, т. е. с запада на восток, или против часовой стрелки. Траектория движения полюса имеет вид спирали, которая то закручивается, то раскручивается, не выходя из квадрата со сторонами 30 м.

Закручивание и раскручивание (мгновенный полюс то приближается к среднему, то удаляется от него), величина отклонения мгновенного полюса от своего среднего положения зависят от внутренних процессов, происходящих в недрах Земли и влияющих на положение оси вращения. Бывают устойчивые периоды, когда полюс в течение нескольких лет остается почти неподвижным, например в 1934—1940 гг. (рис. 42), и бывают годы, когда амплитуда движения сильно увеличивается (1974—1980 гг.) (рис. 43). Полюс совершает (как уже говорилась ранее) два периодических движения: сво-

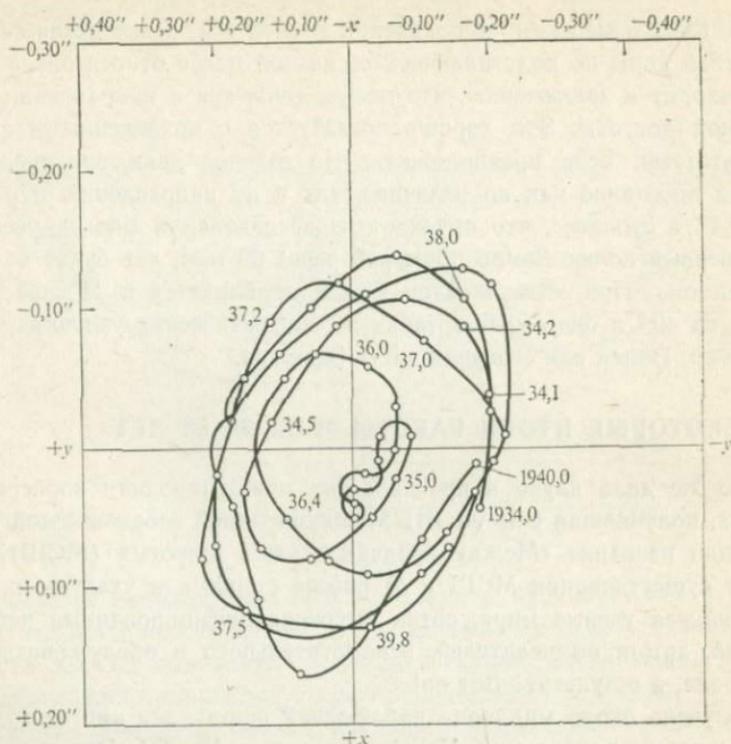


Рис. 42. Движение Северного полюса Земли за 1934—1940 гг.

бодное с периодом около 14 месяцев и вынужденное с годовым периодом (причем первое по интенсивности в три раза сильнее второго), и третье — с полугодовым. На них накладывается еще ряд кривых неполярных изменений широты. Из коротких полярных периодов заметнее полугодовое, не очень резко выраженное; сложение всех этих движений и дает наблюдаемую картину.

Анализ координат полюса, полученных из наблюдений за последние 90 лет, показывает, что вынужденное движение происходит по эллипсу с запада на восток; величина больших полуосей эллипса лежит в пределах от 2,7—3,4 м, малых полуосей — 1,8—2,5 м, эксцентриситетов — 0,15—0,46, а большая полуось имеет значения от 145 до 205° восточной долготы.

Свободное движение полюса по тем же данным имеет почти круговую траекторию. Оно характеризуется еще большей изменчивостью своих параметров. Период свободного движения составлял от 1,13 до 1,21 года (наиболее вероятно 1,19 года). Радиус свободного движения полюса, например, в 1930—1940 гг. не превышал 2,5 м,

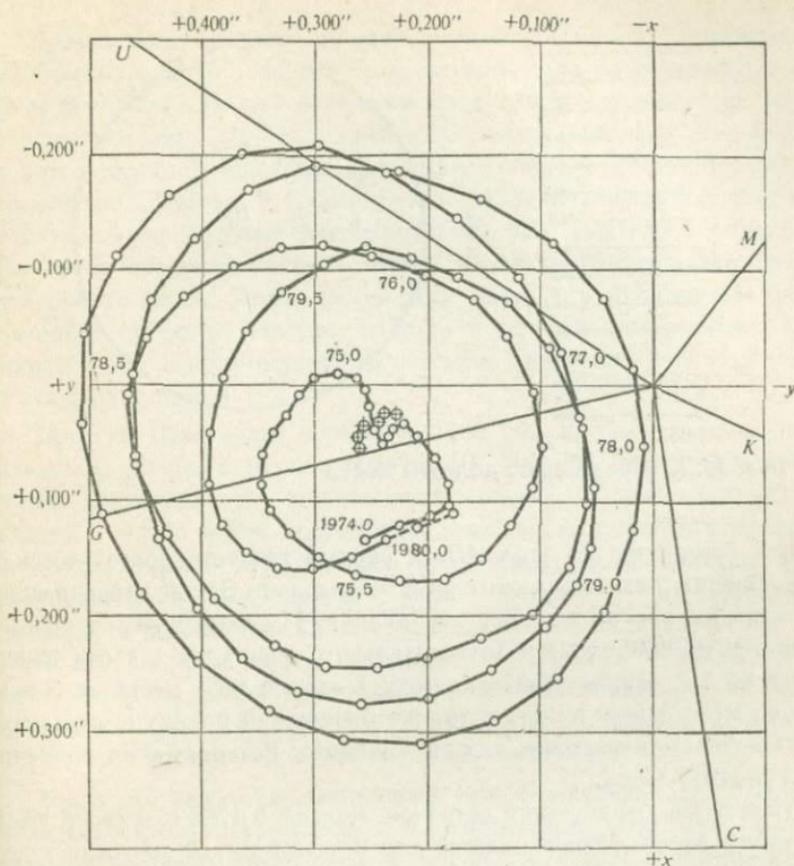


Рис. 43. Движение Северного полюса Земли за 1974—1980 гг.

а в 1950—1955 гг. достигал 9,5 м. В среднем за последние 90 лет он составлял 5,1 м.

ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ДОЛГОТА

В основе астрономического определения долготы места на земной поверхности лежит единственный принцип, который заключается в сопоставлении значения местного (безразлично — звездного, среднего или истинного) времени в определяемом и исходном (начальном) пунктах в один и тот же физический момент. Эта задача в свое время была колоссально трудной, и не случайно широту научились определять на полторы тысячи лет раньше, чем долготу.

Поясним схему определения долготы. Изобразим экватор и проекцию на него двух меридианов Земли $АП_с$ и $БП_с$ (рис. 44). Пусть в точке $А$ сейчас полдень; в точке $Б$ полдень наступит тогда, когда

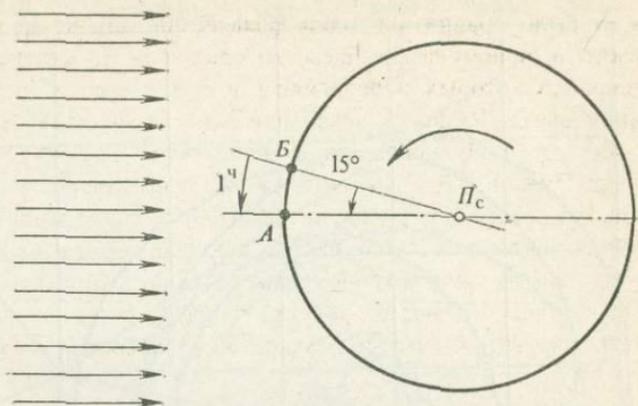


Рис. 44. К определению долготы места

Земля повернется на угол $АПсБ$, равный разности долгот точек $А$ и $Б$. Значит, разность долгот двух меридианов Земли равна разности местных времен на этих меридианах. Поскольку Земля поворачивается на 360° за 24 ч (относительно Солнца), за 1 ч она повернется на 15° . Чтобы узнать долготу λ какого-либо места на Земле, нужно знать время в один и тот же физический момент в этом месте и на нулевом меридиане, т. е. в Гринвиче. Разность этих времен и даст долготу места.

Известный французский астроном Лаланд в 1764 г. в своей «Астрономии» писал: «Крайне важно для успеха морской торговли и для безопасности людей, посвятивших ей свою жизнь, иметь возможность в открытом море определять свой градус долготы. Эта задача сводится к тому, что нужно знать, который час на корабле и который час в исходном месте, например, в Париже; который час на корабле можно узнать легко, наблюдая высоту Солнца или звезды; трудность заключается, таким образом, в том, чтобы знать в каждый момент в открытом море, который час в Париже». Все типы часов, существовавшие до изобретения часов с маятником, были непригодны для определения долгот мест на земной поверхности. И даже маятниковые часы, изобретенные Х. Гюйгенсом в 1657 г., были непригодны для мореплавания и не оправдали надежды. Лишь спустя столетие после изобретения Х. Гюйгенса был изобретен хронометр, сделавший морское судоходство менее опасным, позволивший уверенно определять долготу места.

Даже в середине XIX столетия задача определения долготы считалась очень трудоемкой и сложной. Напомним, как в 1845 г. определялась долгота Московской обсерватории на Пресне относительно Пулковской обсерватории, где долгота была известна.

Нужно было сравнить в один физический момент пулковские и московские астрономические часы, которые шли по местному времени и поправки которых определялись в том и другом месте по наблюдениям звезд. Разность показаний этих часов дала бы разность долгот Москвы и Пулкова, или, иначе говоря, долготу Москвы относительно Пулкова. В Пулкове взяли 40 экземпляров хороших хронометров, ход которых предварительно был тщательно определен. Для всех хронометров были взяты поправки относительно точных пулковских часов. Затем хронометры повезли в Москву; 28 хронометров с суточным заводом повезли в специальном экипаже, а 12 хронометров с восьмисуточным заводом упаковали в особый ящик и отправили почтой.

Путь из Петербурга в Москву (660 км) преодолевали на перекладных, совершая путешествие за 60—70 ч. В Москве все хронометры сравнивались с московскими часами, их показания записывались и после этого хронометры немедленно отправлялись таким же путем обратно в Пулково. В Пулкове все хронометры опять сравнивались с пулковскими часами, учитывались их поправки и находилась разность показаний московских и пулковских часов.

Чтобы получить точный результат, из Пулкова в Москву и обратно было сделано четыре полных рейса (один рейс — путь туда и обратно). Долгота Москвы относительно Пулкова получилась 0 ч 28 мин 58,230 с вероятной погрешностью $\pm 0,031$ с.

Такая же операция проводилась при определении долготы Пулкова относительно Гринвича, т. е. относительно основного Гринвичского меридиана. Каких средств и сил это стоило — теперь трудно сказать, но это нужно было сделать.

В 1920 г. была определена долгота Парижа относительно Гринвича (двенадцать хронометров перевозили на самолете). Операция прошла быстрее и успешнее.

В настоящее время благодаря современной технике (кварцевым и атомным часам) и ритмическим сигналам, передаваемым обсерваториями, определения долготы совершенно изменились и не представляют тех трудностей, с которыми астрономы и геодезисты встречались в прошлые времена.

Теперь схема определения долготы места наблюдения λ выглядит следующим образом.

Наблюдатель определяет поправку своих часов U (т. е. насколько часы уходят вперед или отстают) по местному времени для момента T , который показывают часы. Тогда поправка в момент T_1 будет равна $U_1 + \frac{\omega}{24}(T - T_1)$, где ω — ход часов (т. е. изменение поправки за сутки) известен.

Приняв сигналы времени, передаваемые в известные моменты из Гринвича в момент T_2 наблюдатель сравнивает показания своих часов с гринвичскими в гринвичский момент U_2 . Тогда гринвичское время по отношению к начальному моменту T , будет

$$U_2 + \frac{\omega}{24} (T - T_2).$$

Если долготы считать положительными к востоку, то долгота места

$$\begin{aligned} \lambda &= \left[U_1 + \frac{\omega}{24} (T - T_1) \right] - \left[U_2 + \frac{\omega}{24} (T - T_2) \right] = \\ &= U_1 - U_2 - \frac{\omega}{24} (T_1 - T_2). \end{aligned}$$

Здесь T_1, T_2 — известны по часам наблюдателя, ω — определяется заранее; момент передачи сигналов из Гринвича U_2 и поправки местных часов U_1 тоже известны. Значит, известна искомая долгота λ . В полученную долготу λ вводятся поправки (известные) за распространение радиоволн, запаздывание в приемниках и некоторые другие.

ИЗМЕНЯЕМОСТЬ ДОЛГОТ

Изменения долгот (так же, как и широт) происходят от перемещения полюса вращения Земли, колебания отвесной линии, деформации земной поверхности, перемещения материков и ряда других, зачастую неизвестных, причин.

Изменение направления отвесной линии в пространстве вызывает изменение положения зенита места наблюдения на небесной сфере, а следовательно, и небесного меридиана, и долготы места.

Зависимость между долготой и широтой места наблюдения и координатами движения мгновенного полюса x и y около его среднего положения выражается формулой

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{1}{15} (x \sin \lambda - y \cos \lambda) \operatorname{tg} \varphi,$$

где $\Delta\lambda$ — изменение долготы пункта наблюдений от Гринвича, выраженное в секундах времени. Число 15 вводится для перевода дуговых единиц в единицы времени. Величины x и y — проекции дуги S (дуга от среднего полюса до мгновенного) на меридианах с долготами 0 и 90° (долготы считаются положительными к западу от Гринвича). Если известны координаты полюса, вычисляемые из специальных наблюдений станций службы движения полюса Земли, приближенно известны φ и λ , то вычисление величины $\Delta\lambda$ производится по

приведенной выше формуле. Если λ получено из определения долгот, то средняя долгота места наблюдения от Гринвича $\lambda_0 = \lambda - \Delta\lambda$.

Таким образом, изменение долготы места наблюдения зависит от широты φ ; на экваторе оно стремится к нулю, на полюсе достигает больших величин.

Погрешности определения координат, т. е. величины $\varphi - \varphi_0$ и $\lambda - \lambda_0$, по сравнению с точностью современных наблюдений представляют собой достаточно заметные величины, имеющие систематический характер. Поэтому при обработке первоклассных астрономических наблюдений их нужно учитывать, т. е. результаты наблюдений необходимо приводить к среднему полюсу и из полученных при наблюдениях мгновенных значений широт и долгот определять их среднее значение. Относя наблюдаемые координаты светил, исправленные за движение полюса к среднему полюсу Земли, мы закрепляем ось вращения Земли в ее теле и считаем ось неподвижной.

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

С тех пор как стало известно, что Земля вращается около своей оси, при всех астрономических наблюдениях и вычислениях допускалась гипотеза, не вызывающая никаких сомнений: вращение Земли равномерное и ее никем не видимая ось не изменяет своего положения по отношению к звездам. Само собой разумеется, Земля принималась за твердое тело.

Допущение твердости Земли и ее равномерного вращения означало, что координаты данного места на Земле (положение тела относительно других объектов) остаются неизменными. Дальнейшие астрономические наблюдения и позднее теория вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной точки заставили отказаться от этих гипотез.

Сомнения в постоянстве скорости вращения Земли возникли после открытия Э. Галлеем в 1695 г. векового ускорения движения Луны. Мысль о вековом замедлении вращения Земли под действием приливного трения впервые была высказана И. Кантом в 1755 г. Сомнения в неподвижности оси вращения Земли возникли у Л. Эйлера в 1758 г. Во второй половине прошлого столетия появились подозрения о нерегулярных флуктуациях скорости вращения Земли и движении полюсов. Чуть позднее было установлено, что Земля вращается неравномерно, наблюдаются периодические, вековые и нерегулярные изменения скорости вращения и соответственно величины

суток. С тех пор за неравномерностью вращения Земли ведутся регулярные астрономические наблюдения.

Изменения скорости суточного вращения Земли можно обнаружить из сопоставления неравномерного Всемирного времени, связанного с вращением Земли, с любым более равномерным временем. До 1955 г. единственным более равномерным, чем Всемирное, было эфемеридное время, определяемое по наблюдениям Луны. К сожалению, точность определения эфемеридного времени столь низка, что с помощью него можно вычислить лишь характеристики скорости вращения Земли, усредненные за интервал не менее одного года.

Начиная с 50-х годов для измерения времени введены более стабильные приборы — кварцевые часы, ход которых регулируется вибрациями пьезокварцевой пластинки, вызываемыми переменным электрическим зарядом. За последние десятилетия появились более совершенные приборы — атомные часы, дающие сверхточное атомное время (время определяется с помощью электромагнитных колебаний, излучаемых атомами некоторых веществ).

Шкала атомного времени основана на применении высокостабильных молекулярных и атомных эталонов частоты для регулировки кварцевых часов. Она отличается почти совершенной равномерностью и не зависит от вращения Земли.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ¹

Изменение скорости вращения Земли за всю историю инструментальных наблюдений (последние триста лет) показано на рис. 45. За характеристику скорости вращения Земли здесь и далее берется величина уклонения Δt земных суток от атомных, даваемых атомными часами. Чем короче земные сутки ($\Delta t < 0$), тем быстрее вращается Земля. На рис. 45 отчетливо видны сложные нерегулярные флуктуации угловой скорости вращения Земли с характерными периодами около нескольких десятков лет. Наиболее быстро Земля вращалась около 1870 г., когда длительность земных суток была на 0,003 с короче эфемеридных, а наиболее медленно — около 1903 г. (земные сутки были длиннее эфемеридных на 0,004 с). С 1903 по 1934 г. происходило ускорение вращения Земли. С конца 30-х годов до 1972 г. наблюдалось замедление, которое иногда сменялось периодами небольшого ускорения. Последние наблюдались в 1948—1953 и 1958—1961 гг. С 1973 г. по настоящее время Земля ускоряет свое вращение. Колебание величины Δt , наблюдавшееся с 1903 по 1972 г., часто называют 60—80-летним. В XIX в. аналогичное колебание Δt отмечалось с 1845 по 1903 г. Однако в более ранние годы эти коле-

¹ Сидоренков Н. С. Неравномерность вращения Земли и движение полюсов. — Природа, № 4, 1982. М., Наука, с. 82—91.

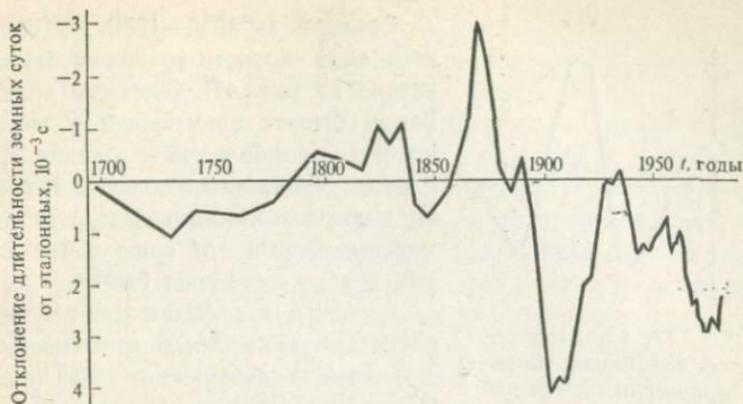


Рис. 45. Изменение скорости вращения Земли за всю историю инструментальных наблюдений (последние триста лет)

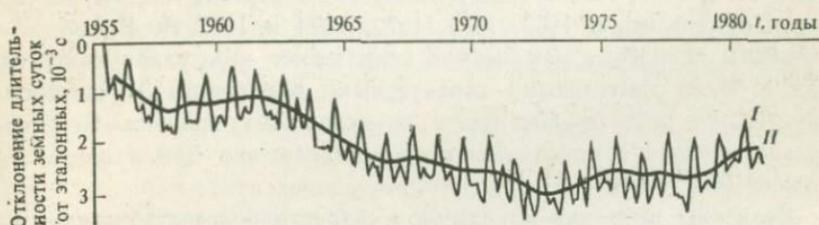


Рис. 46. Ход среднемесячных величин Δt за последние 25 лет (по данным Н. С. Сидоренкова)

бания не прослеживались. К сожалению, данные XVII—XVIII вв. имеют очень низкое разрешение. Интервалы времени, между которыми определялись величины Δt , достигали иногда 29 лет.

В 1955 г. были запущены атомные часы, которые позволили получить новое равномерное время — атомное. Благодаря этому появилась возможность регистрировать все колебания скорости вращения Земли с периодами более одного месяца. Ход среднемесячных величин Δt за последние 25 лет иллюстрирует рис. 46, из которого видно, что скорость вращения Земли меняется постепенно, не обнаруживая каких-либо внезапных скачков. Сравнивая рис. 45 и 46, можно убедиться, что заметные на рис. 45 «скачки» скорости вращения Земли возникают из-за того, что здесь значения нанесены через длительные промежутки времени (до 1900 г.—через пятьдесят лет).

На рис. 46 хорошо видны описанные выше долгопериодические изменения скорости вращения Земли II и происходящие на их фоне сезонные колебания I.

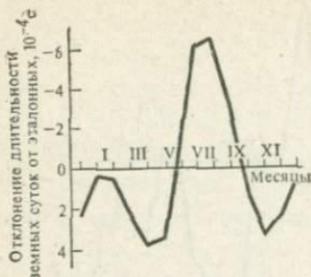


Рис. 47. Среднее сезонное колебание скорости вращения Земли за 1956—1980 гг.

Среднее за 1956—1980 гг. сезонное колебание скорости вращения Земли показано на рис. 47. Скорость вращения Земли бывает наименьшей в апреле и ноябре, а наибольшей — в конце января и июля. Январский максимум значительно меньше июльского. Разность между максимальными Δt в июле и в апреле или ноябре составляет 0,001 с.

Величина январского максимума скорости вращения Земли испытывает значительные колебания от года к году. Прослеживается квазидвухлетний цикл колебаний. Так, в 1962, 1966, 1968, 1970, 1973, 1975, 1978 и 1980 гг. январские максимумы скорости были меньше, чем соответственные в 1963, 1965, 1967, 1969, 1971, 1972, 1974, 1976, 1977, 1979 и 1981 гг. Большие январские максимумы скорости отмечались в 1963, 1971, 1972, 1974 и 1977 гг. Кроме того, величины январских максимумов испытывают нерегулярные колебания с более длительными характерными временами. В частности, заметен их рост от 50-х годов к настоящему времени. Особенно сильно январские максимумы скорости вращения Земли возросли в начале 70-х годов.

Величины июльских максимумов скорости более стабильны. Они обнаруживают квазিশестилетнюю цикличность. Наибольшие величины июльских максимумов скорости отмечались в 1958, 1964, 1970, 1977 гг., а наименьшие в 1961, 1968, 1972 и 1979 гг.

Формально сезонные колебания обычно описывают суммой годовой и полугодовой гармоник. Амплитуды и фазы этих гармоник позволили выявить наиболее существенные причины неравномерности вращения Земли.

Оказалось, что заметную роль в колебаниях скорости вращения Земли с периодами менее одного месяца играют земные приливы. Приливообразующая сила растягивает Землю вдоль прямой, соединяющей ее центр с центром возмущающего тела — Луны или Солнца. Моменты инерции сплюсненной Земли больше, чем моменты инерции недеформированной шарообразной планеты. А поскольку момент импульса Земли (т. е. произведение ее момента инерции на угловую скорость) должен оставаться постоянным, скорость вращения сплюснутой Земли меньше, чем скорость недеформированной. При движении Луны вокруг Земли и системы Земля—Луна вокруг Солнца расстояние от Земли до Луны и Солнца меняется. Поэтому приливообразующая сила колеблется во времени, что в конечном итоге и вызывает неравномерность вращения Земли. Наиболее значительными

из этих приливных изменений скорости вращения Земли являются колебания с полумесячным и месячным периодами. На рис. 46 они не видны из-за недостаточного разрешения величины Δt .

Приливные выступы постоянно перемещаются по земной поверхности вслед за Луной и Солнцем с востока на запад, т. е. в направлении, обратном суточному вращению Земли. Естественно, что при таком перемещении возникают силы трения, которые тормозят вращение Земли, из-за чего и должно происходить вековое замедление вращения Земли. Вторая причина заключается в том, что Земля вращается не как твердое тело, угловая скорость вращения всех точек которого от центра до периферии одна и та же. У Земли же угловые скорости точек тем меньше, чем ближе они к центру Земли. На границе перехода сравнительно твердой мантии к жидкому ядру скорость вращения должна измениться плавным «скачком», вследствие чего между мантией и жидким ядром возникнет сила трения, тормозящая вращение мантии. Расчеты показывают, что из-за этого сутки должны удлиниться на 0,003 с за столетие.

Таким образом, неравномерности вращения Земли, представленные на рис. 45 и 46, почти не связаны с влиянием приливов, а вызваны другими причинами.

В течение года массы воздуха и влаги (воды, снега и льда) перераспределяются между материками и океанами, а также между Северным и Южным полушариями. Так, в январе масса воздуха над континентом Евразия на $6 \cdot 10^{15}$ кг больше, чем в июле. От января к июлю из Северного полушария в Южное переносится $4 \cdot 10^{15}$ кг воздуха. В течение всей зимы происходит накопление снега в северных районах Евразии и Северной Америке. Весной же снег тает и влага возвращается в Мировой океан. Все это изменяет момент инерции Земли и в какой-то степени сказывается на ее вращении. Расчеты показывают, что сезонное перераспределение воздушных и водных масс мало влияет на сезонную неравномерность вращения Земли, но почти полностью обуславливает вынужденное движение полюсов.

Исследования последней четверти века показали, что главная причина сезонной неравномерности вращения Земли — атмосферная циркуляция. Известно, что в среднем атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад (дуют восточные ветры), а в умеренных и высоких — с запада на восток (обладают западные ветры). Момент импульса восточных ветров отрицателен, а западных — положителен. Можно было бы предположить, что эти моменты компенсируют друг друга и момент импульса ветров всей атмосферы всегда равен нулю. Однако подсчеты автора показывают, что момент импульса восточных ветров в несколько раз меньше момента импульса западных ветров. Поэтому момент импульса ветров всей атмосферы не равен нулю, а составляет в сред-

нем за год $13 \cdot 10^{25}$ кг·м²·с⁻¹. Его величина меняется в течение года от $14 \cdot 5 \cdot 10^{25}$ кг·м²·с⁻¹ в апреле и ноябре, до $9 \cdot 10^{25}$ кг·м²·с⁻¹ в августе.

Момент импульса — это физическая величина, которая не может возникать или уничтожаться. Она способна лишь перераспределяться. В рассматриваемом случае перераспределение происходит между атмосферой и Землей. Когда момент импульса атмосферы увеличивается, т. е. усиливаются слабые или ослабевают восточные ветры, момент импульса Земли уменьшается (т. е. замедляется ее вращение). Когда же момент импульса атмосферы уменьшается (ослабевают западные или усиливаются восточные ветры), вращение Земли ускоряется. Суммарный момент импульса Земли и атмосферы всегда остается неизменным. Этот результат может служить хорошей иллюстрацией того, что закон сохранения момента импульса справедлив не только для физических лабораторных экспериментов, но и в глобальных масштабах.

Факт, что момент импульса ветров всегда положителен, говорит о том, что атмосфера в целом вращается вокруг суточной оси быстрее Земли. Уподобляя движение атмосферы в целом вращению твердого тела, можно сказать, что атмосфера (обращается вокруг оси за 23 ч 36 мин в апреле и ноябре и за 23 ч 43 мин в августе) обращается вокруг Земли за 70 сут в апреле и ноябре и за 113 сут в августе. В среднем за год этот период (сутки для атмосферы делятся 23 ч 38 мин, а не 23 ч 56 мин, как для Земли) равен 78 сут.

Можно предположить, что раз атмосфера обгоняет Землю в суточном вращении, то она должна непрерывно ускорять вращение Земли. Однако на неравномерность вращение Земли влияют лишь изменения момента импульса ветров. Постоянная же величина момента импульса ветров возникла у Земли в момент формирования атмосферной циркуляции. Тогда скорость вращения Земли немного замедлилась (длительность суток возросла на 0,002 с) и остается таковой в настоящее время. Если источник, поддерживающий ветры в атмосфере, — Солнце иссякнет, то атмосферная циркуляция прекратится, момент импульса ветров стечет к Земле и длительность суток примет свое первоначальное значение (уменьшится на 0,002 с).

Атмосферу, неравномерно разогретую по горизонтали солнечными лучами, можно рассматривать как тепловую машину. Она превращает тепловую энергию Солнца в кинетическую энергию ветров. Наиболее теплые части атмосферы в этом случае выполняют роль нагревателя, а самые холодные — холодильника. Рабочим телом служит сам воздух. В современной физике атмосферы известно несколько тепловых машин. Важнейшими из них являются тепловые машины, порождаемые контрастом температур между экватором Земли и полюсами. Академик В. В. Шулейкин назвал их тепловыми машина-

ми первого рода. Одна из них работает в Северном полушарии, а другая — в Южном. Благодаря этим машинам поддерживаются наблюдаемые восточные ветры в низких широтах и западные — в умеренных и высоких, т. е. положительный момент импульса ветров. Чем больше разность температур между экватором и полюсом, тем интенсивнее атмосферная циркуляция в данном полушарии и тем больше величина момента импульса ветров. Разность температур в каждом полушарии колеблется с годовым периодом. Она наибольшая зимой и наименьшая летом. Поэтому момент импульса ветров Северного полушария, удерживаемый тепловой машиной первого рода, совершает периодические колебания с периодом в один год от максимального значения в январе до минимального в июле. В Южном полушарии годовое колебание имеет противоположную фазу: момент импульса максимален в июле, а минимален в январе. Годовые колебания ветров Северного и Южного полушарий компенсируют друг друга, и момент импульса ветров всей атмосферы должен оставаться постоянным. Итак, тепловые машины первого рода обуславливают появление в атмосфере положительной величины момента импульса ветров, но почти не влияют на наблюдаемые его сезонные колебания.

Долгое время оставалось неясным, почему момент импульса ветров всей атмосферы испытывает наблюдаемые сезонные колебания. В 1975 г. автором было обнаружено, что в верхних слоях атмосферы самой теплой областью являются не экватор и не параллель, на которой Солнце в полдень бывает в зените, а полярная «шапка» летнего полушария (в июле северная, а в январе южная). Оказалось, что средняя температура воздуха непрерывно убывает от полюса летнего полушария до полюса зимнего (в июле от Северного полюса до Южного, а в январе от Южного полюса до Северного). Стало ясно, что в атмосфере имеется тепловая машина, нагревателем в которой является атмосфера летнего полушария, а холодильником — зимнего. Эта междуполушарная тепловая машина препятствует работе тепловых машин первого рода. Она уменьшает величину момента импульса ветров, удерживаемую в атмосфере тепловыми машинами первого рода. Чем больше контраст температур между полушариями, тем значительнее этот эффект. В январе и июле, когда работа междуполушарной тепловой машины наиболее интенсивна, момент импульса ветров уменьшается до минимальных значений и скорость вращения Земли достигает максимальных величин. В апреле и ноябре температурные различия между атмосферой Северного и Южного полушарий выравниваются; междуполушарная тепловая машина прекращает свою работу, поэтому в атмосфере удерживается предельно большая величина момента импульса ветров и скорость вращения Земли становится минимальной.

Различие величин июльского и январского максимумов скоростей вращения Земли связано с тем, что атмосфера Северного полушария в среднем за год теплее атмосферы Южного полушария. Поэтому контраст температур между полюсами в июле значительно больше, чем в январе. Если бы подстилающие поверхности в Северном и Южном полушариях были одинаковы, то величины январского и июльского максимумов скорости вращения Земли не различались бы. Интенсивность работы междуполушарной тепловой машины меняется от года к году. В соответствии с этим меняются и параметры сезонных колебаний скорости вращения Земли.

ПРИРОДА ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Долгопериодические изменения скорости вращения Земли слишком велики, чтобы их можно было объяснить перераспределением момента импульса между атмосферой и Землей. Так, например, замедление скорости вращения с 1961 по 1972 г. (см. рис. 47) было таким, что момент импульса Земли уменьшился на $14 \cdot 10^{25}$ кг·м²·с⁻¹.

Если бы это замедление произошло из-за перераспределения момента импульса между Землей и атмосферой, то момент импульса ветров в 1972 г. был бы на $14 \cdot 10^{25}$ кг·м²·с⁻¹ больше, чем в 1961 г. Другими словами, скорости ветров в атмосфере к 1972 г. должны были увеличиться почти в два раза. Однако столь больших долгопериодических колебаний атмосферной циркуляции нет. Такие же простые оценки изменений момента инерции Земли, необходимые для объяснения долгопериодической неравномерности вращения Земли, дают неестественно большие величины.

До последнего времени считалось, что долгопериодическая неравномерность вращения Земли не может вызываться геофизическими процессами, протекающими на земной поверхности. Ее обычно связывали с такими внутриземными процессами, как взаимодействие ядра и мантии Земли, перекристаллизация некоторых пород, слагающих Землю. Однако результатов наблюдений, которые бы подтверждали существование этих процессов внутри Земли, в настоящее время нет.

В последние годы получен ряд эмпирических данных, которые заставляют пересмотреть эти взгляды на природу межгодовой неравномерности вращения Земли.

Влияние атмосферы на вращение Земли можно оценить не только в результате подсчета изменения момента инерции и момента импульса атмосферы, но и путем вычисления моментов сил, действующих на Землю со стороны атмосферы. К ним относятся, как известно, моменты сил трения ветра о подстилающую поверхность и моменты сил давления на горные хребты, которые, подобно «парусам»,

стоят на пути ветров. Для того чтобы определить эти моменты сил, требуются данные о полях ветра в приземном слое или данные об атмосферном давлении над всей Землей. Зная суммарный момент сил, легко вычислить ускорения вращения Земли, по которым в свою очередь нетрудно рассчитать неравномерность вращения Земли. Доктор физико-математических наук Н. С. Сидоренков, воспользовавшись этим методом, вычислил неравномерность вращения Земли за 1956—1977 гг. по данным о полях среднемесячного атмосферного давления на уровне моря над всем земным шаром за указанный период.

Расчеты показали, что не только сезонная, но и долгопериодическая неравномерности вращения Земли вызывались в 1956—1977 гг. механическим воздействием атмосферы на Землю. Этот результат указывает на существование переноса порций иногда положительного, а иногда отрицательного момента импульса через приземный слой атмосферы, что приводит к долгопериодической неравномерности вращения Земли. Соответствующие изменения момента импульса ветров, необходимые для выполнения баланса, не наблюдаются. Поэтому должен быть какой-то «поставщик» момента импульса в атмосферу. Естественно было предположить, что атмосфера получает момент импульса либо из околоземного космического пространства, либо от Земли — в процессе долгопериодического перераспределения влаги. Оценки показали, что поток момента импульса из космоса пренебрежимо мал, и дальнейшие усилия были направлены на исследования роли перераспределения влаги.

Как известно, около 2 % всей воды на Земле находится в замерзшем состоянии (в основном в виде льда). Общая масса льда в современную эпоху равна $28,4 \cdot 10^{18}$ кг: из них 90 % приходится на ледниковый щит Антарктиды, 9 % — на ледник Гренландии и менее 1 % — на все остальные горные ледники. Площади ледниковых щитов составляют в Антарктиде $13,9 \cdot 10^{12}$ м², в Гренландии $1,8 \times 10^{12}$ м², горных ледников — $0,5 \cdot 10^{12}$ м².

Масса ледников меняется во времени значительным образом. Например, 12 000 лет назад растаял громадный ледниковый щит, покрывавший в четвертичном периоде почти всю Русскую равнину и значительные пространства Западной Европы и Северной Америки. Во время малого климатического оптимума, который был около 1000 лет тому назад, ледниковый щит Гренландии имел значительно меньшую массу, чем ныне. Такое перераспределение влаги между Мировым океаном и ледниковыми щитами неизбежно сопровождается изменением момента инерции Земли и должно приводить к неравномерности вращения Земли и движению полюсов.

Теория приводит к системе алгебраических уравнений, связывающих величину скорости вращения Земли и координаты полюса с

массами льда в Антарктиде, Гренландии и воды в Мировом океане. Эти уравнения позволяют решать две задачи. Если известны массы льда в Антарктиде, Гренландии и воды в Мировом океане, то можно вычислять характеристики вращения Земли — координаты полюса и скорость вращения Земли. Если же эти массы неизвестны, но имеются характеристики вращения Земли, то можно решить обратную задачу: по координатам полюса и скорости вращения Земли вычислить массы льда в Антарктиде, Гренландии и воды в Мировом океане.

Воспользовавшись данными о вращении Земли за последние 90 лет, Н. С. Сидоренков решил обратную задачу. К сожалению, он не смог сопоставить ряды вычисленных масс льда в Гренландии и воды в Мировом океане с данными наблюдений из-за отсутствия последних. Лишь для Антарктиды удалось сопоставить вычисленную кривую изменений массы льда с наблюдаемой. Качественное согласие кривых оказалось столь хорошим, что связь долгопериодической неравномерности вращения Земли с флуктуациями глобального водообмена кажется возможной. Однако вычисленные колебания глобального водообмена почти в 29 раз больше наблюдаемых.

Эти противоречивые результаты, возможно, свидетельствуют о том, что наблюдаемые особенности вращения — это не неравномерность вращения и движения полюсов всей Земли, а лишь изменения скорости дрейфа литосферы по астеносфере. В самом деле, моменты сил одного знака, возникающие в процессе долгопериодического глобального водообмена, делятся десятилетиями. Возможно, что лежащее под литосферой вещество астеносферы при столь длительных воздействиях ведет себя не как твердое тело, а течет подобно вязкой жидкости. Тогда долгопериодический глобальный водообмен может вызвать скольжение литосферы по астеносфере, не оказывая заметного влияния на более глубокие слои Земли. При проведении астрономических наблюдений изменения скорости дрейфа литосферы будут регистрироваться как неравномерность вращения Земли и движение полюсов. Но на создание таких кажущихся неравномерностей вращения Земли и движения полюсов требуется перераспределение влаги в 29 раз меньшее, чем для действительных неравномерностей вращения и движения полюсов всей Земли. В пользу этой гипотезы говорит неоднократно отмечаемая корреляция сейсмической активности с неравномерностью вращения Земли.

Колебания глобального водообмена зависят от изменений климата Земли. С этих позиций становится понятной связь долгопериодической неравномерности вращения Земли с различными климатическими явлениями. Например, моменты наиболее резких нарушений режима вращения Земли за последние триста лет, наблюдавшиеся в 1870 и 1935 гг., совпадают с эпохами окончания соответственно малого лед-

никового периода и потепления Арктики. Последнее значительное изменение режима вращения Земли, наблюдавшееся в 1972 г., памятно по исключительно жаркому и засушливому лету в европейской части СССР. Замечено, что каждому режиму вращения Земли соответствует своя преобладающая форма атмосферной циркуляции и, следовательно, свой режим погоды в различных районах земного шара.

Периоды колебаний климата не только равны десятилетиям, но и бывают значительно большими. Нерегулярные изменения скорости вращения Земли, вероятно, также могут иметь периоды около столетий и тысячелетий. Поэтому оценки скорости векового замедления вращения Земли менее чем за 2000 лет вряд ли можно связывать только с приливным замедлением. Они могут включать нерегулярные изменения, которые искажают искомую скорость приливного замедления. Так, например, прослеживаемую в последние два столетия тенденцию к замедлению скорости вращения Земли (см. рис. 45) можно объяснить таянием ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды. Этому соответствует и среднее направление векового движения полюсов, получаемое по данным МСДП.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ О ВРАЩЕНИИ ЗЕМЛИ

Изучение неравномерности вращения Земли и движения полюсов перспективно для решения обратных задач. Дело в том, что определять колебания глобальных характеристик атмосферы значительно сложнее, чем отражающие их неравномерности вращения Земли и движения полюсов. Так, вычисление момента импульса ветров по текущим данным с аэрологических станций в настоящее время не ведется, но величины сезонной неравномерности вращения Земли позволяют с удовлетворительной точностью определять колебания момента импульса ветров всей атмосферы.

Сезонная неравномерность вращения Земли отражает работу междуполушарной тепловой машины и может использоваться в качестве показателя разности температур, интенсивности циркуляции воздуха и обмена влагой между Северным и Южным полушариями. Например, таким путем подтверждается наличие прогрессивного уменьшения перегрева атмосферы Северного полушария.

Интересные результаты получены при анализе перегрева Северного полушария по сравнению с Южным, т. е. разности среднегодовых температур Северного и Южного полушарий. Оказалось, что до 1962 г. перегрев Северного полушария по сравнению с Южным был значительным. В 1963 г. он резко уменьшился, что, по-видимому, было связано с загрязнением атмосферы в результате извержения вулкана Агунг (март 1963 г.). После 1963 г. перегрев увеличился, но не до

стиг величины, предшествовавшей 1962 г. В 1971—1972 гг. он резко уменьшился и до 1977 г. оставался малым. После 1977 г. перегрев резко возрос.

Эти выводы, полученные по данным о сезонной неравномерности вращения Земли, хорошо согласуются с эмпирическими данными. По ним перегрев северной полярной области по сравнению с южной в начале 60-х годов был выше обычного на $0,7^{\circ}\text{C}$, а в начале 70-х годов — ниже на $0,6^{\circ}\text{C}$.

Долгопериодическая неравномерность вращения Земли и вековое движение полюса (при точном его определении), по-видимому, могут использоваться для расчета изменений масс льда в Антарктиде, Гренландии и воды в Мировом океане. Важное значение долгопериодическая неравномерность вращения Земли имеет для слежения и в какой-то степени для прогнозирования колебаний климата. Анализ ее указывает на то, что установившийся в 1972 г. климатический режим, вероятно, просуществует еще около двух десятков лет. Это означает, что в одних районах земного шара стало и, вероятно, до начала следующего тысячелетия будет теплее и суше, а в других — прохладнее и влажнее.

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ ПО ИНЕРЦИИ (ДВИЖЕНИЕ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ)

Название этого раздела у некоторых читателей может вызвать недоумение. Что значит вращение по инерции? Движение материальной точки или тела по инерции происходит только тогда, когда на точку или тело не действуют никакие силы. В действительности всякое движение, в частности и вращение Земли вокруг своей оси, происходит под действием сил. Если, например, на веревке тянуть по Земле какой-либо груз, то на него будут действовать силы натяжения веревки, сила тяжести, или вес груза, сила трения о землю и сила сопротивления среды (воздуха). На падающее на Землю тело действуют сила тяжести и сила сопротивления среды.

Спутник, движущийся вокруг Земли по круговой орбите, подчинен двум законам динамики: закону инерции и закону всемирного тяготения. По первому закону он в каждый момент времени движется равномерно и прямолинейно по касательной к траектории и стремится уйти в мировое пространство, но сила, действующая по закону всемирного тяготения, держит прочно его на круговой орбите, заставляя двигаться вокруг Земли. Таким образом, на Земле и в прилегающем к ней пространстве нет движения по инерции, так как нет движущихся тел, к которым не были бы приложены какие-либо силы.

На вращающуюся Землю действуют силы притяжения со стороны Солнца, Луны, планет и других тел Солнечной системы; значит, она тоже вращается не по инерции. Это верно, но внешние силы мало нарушают общий характер вращения Земли, и если ими пренебречь, то в первом приближении вращение Земли можно рассматривать как происходящее по инерции.

Рассмотрим случай вращения Земли по инерции (допуская, что возмущающие силы, действующие со стороны Луны и Солнца, пренебрежимо малы). Будем считать Землю абсолютно твердым телом, т. е. таким, у которого расстояния между любыми двумя точками не изменяются ни при каких обстоятельствах. При этом неважно, как образовалась Земля — по гипотезе Канта-Лапласа (начальная стадия — газово-жидкая раскаленная масса) или по гипотезе О. Ю. Шмидта (образование путем слипания твердых частиц).

Допустим, что Земля по форме представляет собой точный сплюснутый эллипсоид вращения, — однородный или состоящий из концентрических слоев, каждый из которых однороден. В этом случае основные параметры вращения Земли (ее угловая скорость как производная от угла поворота по времени $d\varphi/dt$ и главный вектор количества движения системы G) совпадут с малой главной осью эллипсоида инерции Земли, главный момент инерции которой C наибольший по сравнению с двумя другими моментами ($C > B > A$).

В действительности наши допущения неверны.

Мы не знаем, как образовалась Земля, но можем с большой достоверностью предположить, что в процессе формирования Земли тяжелые элементы группировались около ее центра концентрическими слоями; более легкие породы образовали всю периферию земного шара. По-видимому, в процессе формирования вследствие вращения Земли ее поверхность приняла форму сплюснутого эллипсоида вращения и, вероятно, внутренние слои одинаковой плотности представляют собой также эллипсоиды, похожие на эллипсоид наружной поверхности.

Поэтому можно с большой вероятностью допустить, что центральный эллипсоид инерции Земли является сплюснутым эллипсоидом вращения. В процессе его образования в силу причин, нам неизвестных, ось вращения Земли и главный момент количества движения (вектор) не совпали с малой осью эллипсоида инерции Земли. В результате этого на поверхности Земли (рассматривается одно полушарие) в районе полюса инерции образовались три особые точки, а именно: полюс инерции C — точка пересечения наименьшей оси центрального эллипсоида инерции Земли с поверхностью последней; полюс вращения P — точка пересечения мгновенной оси вращения Земли с ее поверхностью; полюс главного момента G — точка пере-

сечения главного вектора момента количества движения Земли относительно ее центра масс с поверхностью Земли.

Если в точке P построить плоскость, касательную к эллипсоиду вращения Земли, то вектор главного момента количества движения OG будет перпендикулярен этой плоскости.

Рассмотрим вращательное движение Земли как свободного твердого тела около центра ее масс при отсутствии внешних сил (по инерции).

Возьмем связанную с Землей подвижную систему координат $Oxuz$, начало которой совместим с центром масс Земли, а оси направим по главным осям эллипсоида инерции. В этом случае можно определить вращение Земли и положение ее мгновенной оси вращения в теле Земли относительно главных осей.

Изменение положения мгновенной оси вращения Земли описывается уравнениями Эйлера. Из них находят переменные $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — проекции мгновенной угловой скорости на подвижные оси, связанные с Землей. По этим проекциям вычисляется мгновенная угловая скорость вращения Земли $\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}$. Решение уравнений Эйлера приводит к выводу, что скорость вращения Земли около мгновенной оси вращения OP постоянна и скорость вращения самой мгновенной оси вместе с Землей около наименьшей оси эллипсоида инерции OC тоже постоянна. Мгновенная ось вращения Земли OP описывает внутри Земли около мгновенной оси инерции OC конус с круговым основанием. Период вращения Земли около мгновенной оси вращения OP — звездные сутки, период обращения около оси инерции OC

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \frac{C}{C - A},$$

где ω — мгновенная угловая скорость вращения Земли около оси OP , $2\pi/\omega$ — звездные сутки, A и C — главные моменты инерции.

Мы не имеем возможности привести здесь решения уравнений Эйлера и ограничимся лишь геометрической интерпретацией этого явления (движения полюса).

Пусть фигура, изображенная на рис. 48, представляет собой сфероид (внутренний эллипс) и эллипсоид инерции Земли (внешний эллипс). OCC_1 — наименьшая ось сфероида и эллипсоида инерции Земли, OP_1 — мгновенная ось вращения Земли, $ПП$ — касательная плоскость к эллипсоиду инерции в точке P_1 , OG — главный момент количества движения (перпендикуляр к плоскости $ПП$). Если на вращающееся тело не действуют внешние силы, то его главный момент количества движения остается постоянным по величине и направлению. Это — одно из основных положений динамики. Следовательно, плоскость $ПП$ будет по отношению к центру O неизменна в про-

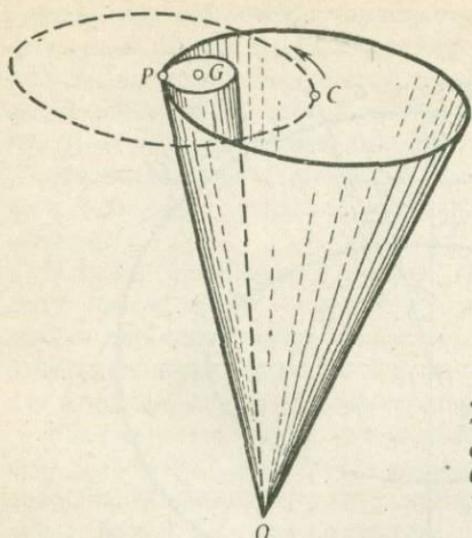


Рис. 49. Малый конус с осью OG (главный момент) неподвижен в пространстве; большой конус с осью OC связан с Землей. При вращении Земли полюс инерции C движется против часовой стрелки (пунктирный круг)

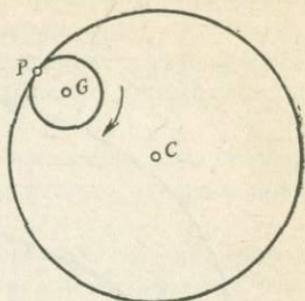


Рис. 50. При вращении Земли малый круг с центром G катится по внутренней поверхности большого круга с центром C , связанного с Землей, против часовой стрелки

нуса содержится в окружности большого конуса или сколько радиусов основания малого конуса содержится в радиусе основания большого. Так как большой конус связан с Землей, то на поверхности Земли точка C и большой круг с центром в C неподвижны и малый круг с центром G катится по внутренней поверхности большого круга с центром в C (рис. 50). В это время точка P внутреннего соприкосновения кругов движется по кругу с центром C против часовой стрелки. Точка P — северный мгновенный полюс Земли, точка C — северный полюс инерции. Значит, при вращении Земли полюс Земли все время движется вокруг полюса инерции, почему он и называется мгновенным полюсом вращения Земли.

Причиной движения полюсов, а следовательно, и изменения широт является то, что по условиям формирования Земли главный момент количества движения Земли OG не совпал с малой осью эллипсоида инерции Земли OC , образовав с ним очень малый угол. Вычисление отношения дуг меридиана эллипсоида инерции $CP : GP$ приводит к формуле для вычисления периода Эйлера, из которой получается, что мгновенный полюс вращения Земли делает полный оборот по поверхности Земли вокруг полюса инерции, т. е. точки C , где ее пересекает малая ось эллипсоида инерции, за 305 звездных суток.

Однако все наблюдения с конца XIX в. показывают, что угол $COP_1 = \mu$ (см. рис. 48) меняется от $0,3$ до $0,1''$ и что период враще-

ния содержит около 428 суток (чандлеровский). Дуга GP должна быть в 305 раз меньше дуги CP , т. е. меньше $0,001''$. Поэтому он и не наблюдается, в силу чего принимают, что главный момент количества движения совпадает с мгновенной осью вращения Земли.

Период движения полюса, полученный из наблюдений, составляет 429,16 сут (уточненный период Чандлера). Расхождение периодов Эйлера и Чандлера происходит оттого, что Земля не абсолютно твердое тело, как это было принято Эйлером, а до некоторой степени упруга. Период Эйлера справедлив для абсолютно твердой Земли, период Чандлера справедлив для реальной Земли. Рассматривая движение Земли по инерции, мы считали Землю эллипсоидом вращения, для которого $A=B$. В действительности Земля несколько отличается от эллипсоида вращения; наибольший и наименьший радиусы экватора разнятся примерно на 200 м.

Если же допустить, что A не равно B , но мало отличается от него, то подробный анализ уравнений, составленных для этого случая при значении $\mu=90^\circ - \varphi' = 0,3''$, приводит к тому, что мгновенная ось вращения Земли будет описывать около оси C замкнутую коническую поверхность и движение мгновенного полюса по поверхности Земли останется таким же, как в предположении, что $A=B$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для того чтобы избежать трудностей с терминологией, которые могут возникнуть у читателей, мы даем приложение, в котором нет последовательного изложения какого-либо раздела, а затронуты только понятия и термины, необходимые для усвоения главного вопроса — вращения Земли.

НЕСКОЛЬКО СТРОК ИЗ АСТРОНОМИИ

Всюду, где бы ни находился наблюдатель, видимый горизонт (если он не загорожен какими-либо предметами) имеет форму круга. А сам наблюдатель оказывается под небесным сводом, форму которого принимает видимая над Землей атмосфера.

Расстояния от Земли до небесных светил самые различные. Светила, принадлежащие к Солнечной системе (Солнце, планеты, кометы), значительно ближе к Земле, чем светила, находящиеся за пределами нашей Солнечной системы (звезды, различные туманности и прочие объекты).

Во многих задачах астрономии нет необходимости знать расстояние до небесных светил. Такие задачи удобнее решать, считая эти расстояния одинаковыми. Поэтому в астрономии введено понятие, или геометрическое построение, называемое *небесной сферой*. В центре этой сферы находится наблюдатель. Радиус сферы принимается таким, чтобы все наблюдаемые светила располагались внутри сферы. Тогда можно мысленно все небесные светила спроектировать на эту сферу и изучать, например, не изменение направления луча, идущего от светила, а движение светила по небесной сфере, что методически проще.

Воспользуемся этой сферой и рассмотрим некоторые основные круги и точки на ней (рис. 51). Заметим, что через две точки сферы можно провести только один большой круг; плоскость большого круга проходит через центр сферы. Два больших круга пересекаются в двух диаметрально противоположных точках. Расстояние между светилами на сфере измеряется только по большому кругу.

Данное нам самой природой на Земле направление отвесной линии широко используется в практике с древнейших времен. Точка пересечения отвесной линии с небесной сферой над головой наблюдателя называется *точкой зенита* или просто зенитом. Противоположная ей точка — *надиром*. Расстояние светила от зенита называется *зенитным расстоянием*.

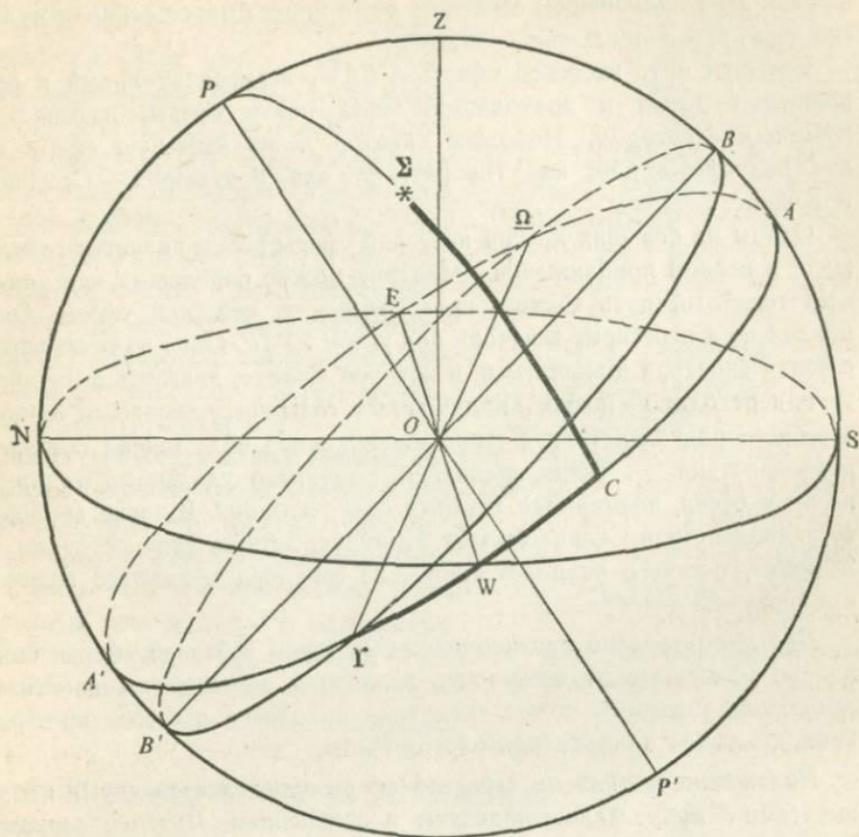


Рис 51. Основные круги и точки небесной сферы.

O — центр небесной сферы; Z — зенит; P — полюс мира; PP' — ось мира; E, S, W, N — точки востока, юга, запада и севера; $SZPN$ — небесный меридиан. $A'EAW$ — небесный экватор; Υ — точка весеннего равноденствия; --- — точка осеннего равноденствия; $\Upsilon B\text{---}$ — эклиптика, ΥC — прямое восхождение светила; $C\Sigma = \delta$ — склонение светила

Точки пересечения небесной сферы с воображаемой осью вращения Земли P и P' называются *полюсами мира*.

Полюс мира, находящийся в области созвездия Малой Медведицы, называется северным полюсом мира; противоположный ему — южным. Прямая PP' , проходящая через оба полюса мира, называется осью мира. Большие круги небесной сферы, проходящие через зенит и надир, носят название *вертикальных кругов*. Большие круги, проходящие через полюсы мира, — *круги склонений*.

Большой круг небесной сферы $PZSN$, проходящий через зенит и полюс мира, называется *небесным меридианом*. Прохождение светила через меридиан при суточном движении, называется его *кульми-*

нацией. При наименьшем зенитном расстоянии бывает верхняя кульминация, при наибольшем — нижняя.

Большой круг небесной сферы $A'EAW$, перпендикулярный к оси вращения Земли и проходящий через центр сферы, называется *небесным экватором*. Небесный экватор делит небесную сферу на две полусферы или, как говорят, на два полушария — Северное и Южное.

Одним из больших кругов небесной сферы $\Upsilon B \text{---} \text{---}$ является *эклиптика*; в первом приближении эклиптику можно определить как видимый годичный путь Солнца среди звезд на небесной сфере. Она наклонена к небесному экватору под углом $23^{\circ}27'$. Одна из точек пересечения экватора и эклиптики, в которой Солнце, двигаясь по эклиптике, переходит из южного полушария в северное, называется *точкой весеннего равноденствия* Υ ; противоположная ей — *точкой осеннего равноденствия* $\text{---} \text{---}$. Точки эклиптики, одинаково удаленные от точек весны и осени, называются *точками солнцестояний*. В точке весеннего равноденствия Солнце бывает 21 марта, летнего солнцестояния — 22 июня, осеннего равноденствия — 23 сентября и зимнего солнцестояния — 22 декабря.

Две диаметрально противоположные точки небесной сферы, одинаково удаленные от всех точек эклиптики, называются *полюсами эклиптики*. Северный полюс эклиптики находится в созвездии Дракона, южный — в созвездии Золотой Рыбы.

Положение светила на небесной сфере определяется двумя координатами — прямым восхождением и склонением. *Прямым восхождением* светила α называется дуга экватора ΥC от точки весеннего равноденствия Υ до точки C — пересечения экватора с кругом склонения светила.

Склонением светила δ называется дуга круга склонения $O\Sigma$ от экватора до светила.

НЕСКОЛЬКО СТРОК ИЗ ГЕОМЕТРИИ

Сечение прямого кругового конуса плоскостью P , перпендикулярной к оси конуса OC (рис. 52), есть окружность. Сечение кругового конуса плоскостью, наклоненной к оси конуса OC на угол, отличающийся от прямого и больший, чем угол между осью и образующей, есть эллипс. Наибольший и наименьший диаметры эллипса называются его осями, большая ось обозначается через $2a$, малая — через $2b$. Под центральным сечением тела, имеющего правильную геометрическую форму, мы понимаем сечение тела плоскостью, проходящей через его геометрический центр.

У шара любое центральное сечение плоскостью есть круг. Если только одно центральное сечение тела плоскостью есть круг, а остальные сечения — эллипсы, то тело называется *эллипсоидом вращения*. Такое тело можно получить, вращая эллипс вокруг одной из его осей. Эллипсоид вращения может быть сплюснутым (репка) и может быть вытянутым (лимон). В первом случае вращение происходит вокруг малой оси, во втором — вокруг большой.

Если два центральных сечения тела представляют собой круги, а все другие — эллипсы, то такое тело называется *трехосным эллипсоидом*. У такого тела все оси разные. Наибольшую ось трехосного эллипсоида обозначают через $2a$, среднюю — через $2b$ и наименьшую — через $2c$. Все три оси взаимно перпендикулярны.

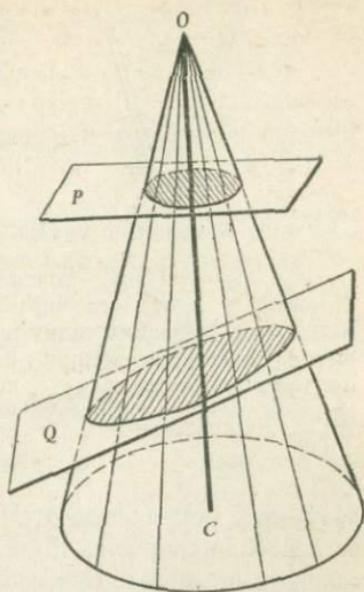


Рис. 52. Сечение конуса плоскостями

НЕСКОЛЬКО СТРОК ИЗ МЕХАНИКИ

Простейшим из механических движений твердых тел является *поступательное*, т. е. такое, при котором всякая прямая, проведенная через любые две точки тела, перемещается параллельно самой себе. Таково движение спарника, соединяющего кривошпы паровозных осей, велосипедных педалей, наклонно расположенной ленты эскалатора, движение плота по прямому участку реки с установившимся течением и т. д. Заметим, что не следует смешивать поступательное движение с прямолинейным. Тело может двигаться криволинейно и вместе с тем поступательно. При поступательном движении все точки описывают одинаковые траектории, т. е. такие, которые при наложении одной на другую совмещаются всеми своими точками и имеет в данный момент одинаковые скорости и ускорения.

Движение тела, при котором по крайней мере две точки остаются неподвижными, называется *вращательным*. Прямая, соединяющая эти две неподвижные точки, называется осью вращательного движения, или *осью вращения*. Вращение тела вокруг неподвижной оси — явление очень распространенное и в примерах не нуждается. При вращении все точки тела имеют одну и ту же угловую, но разные линейные скорости, зависящие от положения точек относительно оси

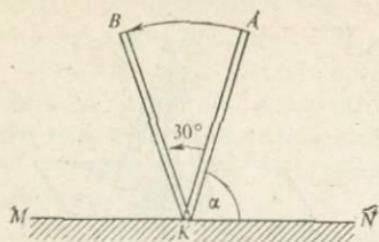


Рис. 53. При повороте стержня в плоскости чертежа около точки K происходит вращение стержня вокруг оси, проходящей через точку K перпендикулярно к плоскости чертежа

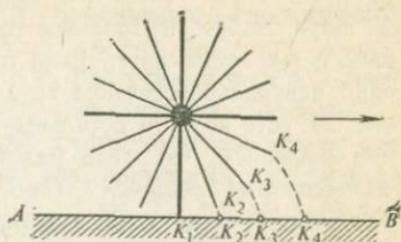


Рис. 54. Прерывное вращение около оси, проходящей через точки K_1, K_2, K_3 и перпендикулярной к плоскости чертежа

вращения. Чем дальше отстоит точка от оси вращения, тем больше ее линейная скорость; точки, лежащие на самой оси, вращательной скорости не имеют. Поступательное и вращательное — суть простые движения.

В действительности тело иногда участвует в двух и даже более поступательных, а также и вращательных движениях или одновременно в поступательном и вращательном; получается так называемое сложное движение. Случай сложения поступательного и вращательного движений очень распространен. Его можно продемонстрировать на качении колеса по прямолинейному участку пути, в котором движение является поступательным (скольжение колеса, когда оно заторможено и не вращается) и вращательным (экипаж неподвижен, колесо вращается — буксует). Или так: ось движется поступательно, а само колесо — поступательно-вращательно. При нормальном качении колеса его движение является сложным.

Возьмем стержень AK (рис. 53) и поставим его одним концом на плоскость MN под некоторым углом α к этой плоскости. Затем повернем этот стержень, например, против часовой стрелки на угол 30° около точки K . Это тоже будет вращение около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа и проходящей через точку K .

Если с колеса снять обод и покатить оставшуюся втулку со спицами по плоскости AB (рис. 54), то колесо будет как бы шагать, перескакивая с одной спицы на другую. Чем больше спиц, тем глаже движение. Когда колесо поворачивается на некоторый угол около конца спицы K , оно вращается около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа и проходящей через точку K_1 . Затем колесо будет опираться на конец следующей спицы K_2 , проходящей через точку K_2 около оси и т. д. Значит, здесь происходит вращение около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа, но эта ось меняет свое по-

ложение, она последовательно проходит через точки K_1, K_2 и т. д.

Аналогичная картина получается, если катить по плоскости настоящее колесо с ободом или обрuch: ось вращения будет проходить через точку соприкосновения обода с плоскостью и непрерывно менять свое положение. Вот такая ось вращения, которая в данный момент занимает одно положение, в следующий момент другое и т. д., непрерывно перемещаясь (безразлично на плоскости или в пространстве), и называется *мгновенной осью вращения*.

Если обычную катушку положить на плоскость, как это показано на рис. 55, *а* и потянуть за нитку в направлении стрелки вправо, то катушка покатится вправо. Если положить катушку, как показано на рис. 55, *б*, и потянуть за нитку опять вправо, катушка покатится вправо, как и в первом случае. Так получается потому, что вращение катушки в том и другом случае происходит около мгновенной оси, проходящей через точку K , и вращающий момент (произведение силы на плечо DK) имеет одинаковое направление.

В различных случаях сложного движения положение мгновенной оси вращения тела может меняться по-разному; так, в случае вращения конуса по плоскости (рис. 56) мгновенной осью является образующая конуса OK , соприкасающаяся в данный момент с плоскостью; она всегда проходит через одну и ту же точку тела O (вершина конуса). В случае вращения волчка его мгновенная ось вращения описывает в пространстве приблизительно коническую поверхность с вершиной в центре тяжести этого тела.

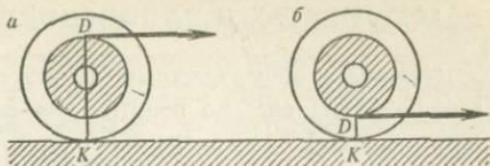


Рис. 55. Схема вращения катушки около мгновенной оси, проходящей через точку K

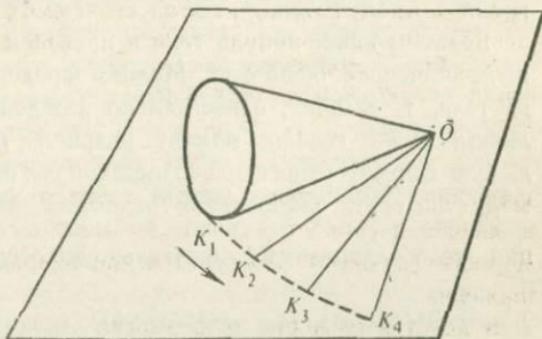


Рис. 56. Вращение конуса по плоскости.

Точка O неподвижна

О МОМЕНТАХ И ЭЛЛИПСОИДЕ ИНЕРЦИИ

Наряду с общеизвестным понятием момента силы в механике твердого тела введено понятие для меры инерции тела (в отношении вращательного движения) — момента инерции.

Моментом инерции точки относительно оси l называется произведение массы точки на квадрат расстояния ее от этой оси.

Если имеется тело и ось, то сумма произведений массы каждой точки этого тела на квадрат ее расстояния от этой оси называется *моментом инерции тела* относительно оси и обозначается $I_l = \sum m^2$, где m — масса точки, r — ее расстояние от оси.

Возьмем какое-нибудь тело и проведем через любую из его точек неограниченное число осей. Можно определить моменты инерции этого тела, т. е. $\sum mr^2$, относительно каждой оси. Все они будут различны, иначе говоря, момент инерции тела (тело может иметь любую форму) относительно каждой оси имеет свое значение. Например, если взять однородный трехосный эллипсоид, то моменты инерции этого эллипсоида относительно его осей будут: $I_a = \frac{1}{5} M(b^2 + c^2)$,

$I_b = \frac{1}{5} M(a^2 + c^2)$, $I_c = \frac{1}{5} M(a^2 + b^2)$, где a, b, c — полуоси трехосного эллипсоида, а M — его масса. На одной из проведенных через любую точку O тела прямых l отложим в обе стороны от точки в каком-нибудь масштабе отрезки, численно равные единице, деленной на корень квадратный из момента инерции тела относительно этой прямой, т. е. величины $OK = 1 \sqrt{I_l}$. Если сделать такое построение для большого числа прямых, проходящих через взятую в теле точку, то концы всех этих отрезков (точки K) будут находиться на различных расстояниях от взятой в теле точки, так как каждой прямой соответствует свой момент инерции. Но концы этих отрезков расположатся на одной поверхности, которая будет иметь форму эллипсоида, какой бы ни была форма самого тела. В общем случае это будет трехосный эллипсоид, в частных случаях — шар и эллипсоид вращения, т. е. фигура, получающаяся от вращения эллипса около одной из его осей, в данном случае — около малой оси.

Такой эллипсоид, который можно построить для каждой точки тела, называется *эллипсоидом инерции тела*.

Если в качестве исходной взять не любую точку тела, а его центр тяжести, то в этом случае эллипсоид инерции называется *центральной эллипсоидом инерции*.

Нужно ясно себе представить, что эллипсоид инерции есть условная, воображаемая поверхность или геометрический образ, наглядно иллюстрирующий изменение величины момента инерции тела относительно различных осей. Три взаимно перпендикулярные оси эл-

эллипсоида инерции (наибольшая, средняя и наименьшая) называются *главными осями*. Моменты инерции относительно этих осей называются *главными моментами инерции*. Они обозначаются буквами A , B и C ($A < B < C$). Момент инерции относительно наименьшей оси эллипсоида инерции есть наибольший из всех моментов инерции. Оси эллипсоида инерции: малая $1: \sqrt{C}$, большая $1: \sqrt{A}$, где A и C — моменты инерции относительно этих осей.

Земля имеет форму, близкую к эллипсоиду вращения (сфероид). Допуская, что она симметрична относительно оси вращения и всюду имеет одинаковую плотность или состоит из концентрических слоев различной плотности, можно полагать, что эллипсоид инерции является также сплюснутым эллипсоидом вращения. Точки пересечения оси вращения с поверхностью Земли называются *полюсами Земли*, или *полюсами вращения*. Точки пересечения наименьшей оси эллипсоида инерции с поверхностью Земли и поверхностью эллипсоида называются *полюсами инерции*. Полюс вращения и полюс инерции могут совпадать, но могут и не совпадать. Полюс вращения движется вокруг полюса инерции с годовым периодом. Но и полюс инерции не остается неподвижным, а несколько смещается. По исследованиям А. Я. Орлова, среднее годовое колебание земного эллипсоида инерции совершается вокруг его наибольшей оси с амплитудой $0,03''$. Полюс инерции колеблется при этом в плоскости меридиана, перпендикулярного к Гринвичскому, отклоняясь от своего среднего положения всего лишь на один метр. В разные годы он может двигаться различно вследствие изменения метеорологических условий.

Важнейшей характеристикой вращения Земли относительно точки (ее центра тяжести) является закон главного момента количества движения системы материальных точек или твердого тела, согласно которому производная по времени от главного момента количества движения тела относительно центра равняется вращающему моменту. Если вращающий момент равен нулю, то главный момент количества движения остается неизменным во все время движения.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Наше дневное светило	5
Восход Солнца	5
Параметры Солнца	6
Энергия Солнца	7
Вращение Солнца	9
Структура поверхностей больших планет	12
Кое-что из истории изучения планет	12
Меркурий	14
Венера	16
Марс	18
Юпитер	21
Сатурн	23
Уран, Нептун и Плутон	24
Вращение планет	24
Полюсы мира: Земли, Луны, Меркурия, Венеры, Юпитера и Сатурна	29
Вращение спутников	31
Из тьмы времен до наших дней	33
Неподвижная Земля — центр мира	33
Геоцентрическая система мира Клавдия Птолемея	36
Гелиоцентрическая система мира Николая Коперника	38
Форма Земли и ее параметры	43
Факты — упрямая вещь!	45
Силы инерции — центробежная и кориолисова	45
Отклонение падающих тел к востоку	47
Маятник Фуко	48
Размытие берегов рек и другие аналогичные явления	49
Изменение силы тяжести	51
Сплюснутость Земли — важнейшая характеристика ее вращения	52
Времена года — следствие вращения Земли	53
Движение оси вращения Земли в пространстве и в теле самой Земли	55
Прецессия	55
Нутация	60
Геометрическая интерпретация прецессии и собственного вращения Земли	61
Внутреннее строение Земли по астрономическим исследованиям	63
Внутреннее строение Земли по данным сейсмологии	69

Обо всем, что окружает Землю и вращается вместе с ней	73
Гидросфера	73
Атмосфера	80
Магнитосфера	87
Гравитационное поле Земли	89
Вращение Земли относительно космических объектов	92
Ориентация на небе; небесный экватор, эклиптика	92
Вращение Земли относительно Солнца	93
Вращение Земли относительно звезд	95
Вращение Земли относительно Луны	96
Восходы и заходы светил на разных широтах Земли	99
Восходы и заходы планет	101
Долгота дня	102
Движение оси вращения в теле Земли	103
Географические координаты	103
Изменяемость широт	105
Работа Сэа Чандлера	109
Формула С. К. Костинского	110
Международная служба движения полюса (МСДП)	112
Выбор параллели и организация наблюдений	112
Широтная станция в Чарджуе	115
Наблюдения уточняют теорию	118
Исследования движения полюсов в России	119
Уточнение формулы С. К. Костинского	124
Вековое движение полюсов Земли	125
Некоторые итоги работы МСДП за 80 лет	127
Географическая долгота	129
Изменяемость долгот	132
Неравномерность вращения Земли	133
Предварительные сведения	133
Основные сведения	134
Природа долгопериодических изменений скорости вращения Земли	140
Использование данных о вращении Земли	143
Вращение Земли по инерции (движение полюсов Земли)	144
Приложение	150
Несколько строк из астрономии	150
Несколько строк из геометрии	152
Несколько строк из механики	153
О моментах и эллипсоиде инерции	156

Константин Алексеевич Куликов

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

Редактор издательства *А. И. Вороновская*
Обложка художника *А. А. Смирнова*
Художественный редактор *В. В. Шутько*
График-иллюстратор *С. И. Ерохин*
Технический редактор *А. В. Трофимов*
Корректор *М. В. Чаплыгина*

ИБ № 5544

Сдано в набор 09.10.84. Подписано в печать 05.02.85.
Т-04575. Формат 84×108^{1/32}. Бумага кн.-журн. имп.
Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л.
8,40. Усл. кр.-отг. 8,61. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 70 000 экз.
Заказ 987/9343—3. Цена 30 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19
Владимирская типография Союзполиграфпрома при Го-
сударственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

103

1

4457

