

Приливы и отливы в морях и в Солнечной системе

Продолжим разговор о силах, действующих на небесные тела, и возникающих при этом эффектах. В этой лекции я расскажу о приливах и негравитационных возмущениях. Что это значит — «негравитационные возмущения»? Возмущениями обычно называют малые поправки к большой, главной силе. Таким образом, речь пойдет о каких-то силах, влияние которых на объект значительно меньше гравитационных.

Какие в природе бывают силы, кроме гравитации? Сильные и слабые ядерные взаимодействия оставим в стороне, они имеют локальный характер (действуют на крайне малых расстояниях). А вот электромагнетизм, как известно, намного сильнее гравитации и распространяется так же далеко — беспредельно. Но поскольку электрические заряды противоположных знаков обычно уравновешены, а гравитационный «заряд» (его роль играет масса) всегда одного знака, то при достаточно больших массах, конечно же, гравитация выходит на первый план. Так что реально мы будем говорить о возмущениях движения небесных тел под действием электромагнитного поля. Больше вариантов нет, хотя есть еще темная энергия, но она действует лишь на космологических (т. е. очень больших) расстояниях.

Как я рассказывал в одной из предыдущих лекций, простой ньютонов закон тяготения

$$F = \frac{GMm}{R^2}$$

очень удобно использовать в астрономии, потому что большинство тел имеют близкую к сферической форму и достаточно удалены друг от друга, так что при расчете их можно заменить точками — точечными объектами, содержащими всю их массу. Но тело конечно-го размера, сравнимого с расстоянием между соседними телами, все-таки испытывает разное силовое влияние в разных своих частях, потому что эти части по-разному удалены от источников гравитации, и это нужно учитывать.

Притяжение плушит и раздирает

Чтобы ощутить приливный эффект, сделаем популярный у физиков мысленный эксперимент: представим себя в свободно падающем лифте (рис. 8.1). Отрезаем веревочку, удерживающую кабину, и начинаем падать. Пока не упали, можем смотреть, что вокруг нас происходит. Подвешиваем свободные массы и наблюдаем, как они себя поведут. Сначала они падают синхронно, и мы говорим, что это невесомость, потому что все объекты в этой кабине и она сама ощущают примерно одинаковое ускорение свободного падения. Но со

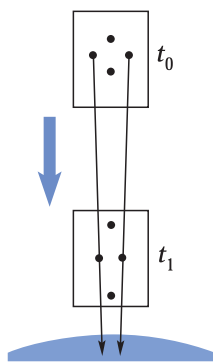


Рис. 8.1. Деформация системы несвязанных точек при свободном падении.

временем наши материальные точки начнут менять свою конфигурацию, потому что нижняя из них вначале была чуть ближе к центру притяжения, чем верхняя, поэтому нижняя, притягиваясь сильнее, начинает опережать верхнюю. А боковые точки всегда остаются на одинаковом расстоянии от центра тяготения, но по мере приближения к нему они начинают сближаться друг с другом, поскольку равные по модулю ускорения не параллельны. В результате система несвязанных объектов деформируется. Это и называют приливым эффектом.

С точки зрения наблюдателя, который рассыпал вокруг себя крупу и смотрит, как перемещаются отдельные крупинки, пока вся система падает на массивный объект, можно ввести такое понятие, как *поле приливных сил*. Определим эти силы в каждой точке как векторную разницу гравитационного ускорения в этой точке и ускорения наблюдателя или центра масс, и если брать только первый член разложения в ряд Тейлора по относительному расстоянию, то получится симметричная картина (рис. 8.2): ближние крупинки будут опережать наблюдателя, дальние — отставать от него, т. е. система будет растягиваться вдоль оси, направленной на тяготеющий объект, а вдоль перпендикулярных ей направлений частицы будут прижиматься к наблюдателю.

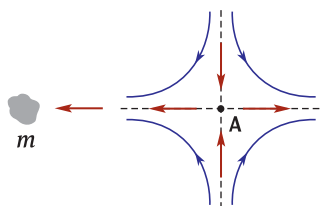
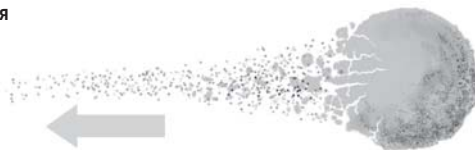


Рис. 8.2. Векторное поле приливных сил в точке А под действием объекта массой m .

Как вы думаете, что будет происходить при затягивании планеты в черную дыру? Тем, кто не слушал лекций по ас-

Рис. 8.3. Художник, не слушавший лекций по астрономии, нарисовал, как разрушалось бы крупное небесное тело при засасывании в черную дыру. В чем его ошибка?

Черная дыра



астрономии, обычно кажется, что черная дыра будет срывать вещество только с обращенной к ней поверхности. Они не знают, что почти столь же сильный эффект проявляется на обратной стороне свободно падающего тела, т. е. оно разрывается в двух диаметрально противоположных направлениях, а отнюдь не в одном.

Опасности открытого космоса

Чтобы показать, насколько важно учитывать приливный эффект, возьмем Международную космическую станцию. Она, как и все спутники Земли, свободно падает в гравитационном поле (если не включены двигатели). И поле приливных сил вокруг нее — это вполне ощутимая вещь, поэтому космонавт, когда работает на внешней поверхности станции, обязательно привязывает себя к ней, причем, как правило, двумя тросиками — на всякий случай, мало ли что может случиться (рис. 8.5). Окажись он непривязанным в том месте, где приливные силы оттягивают его от центра станции, он запросто может потерять с ней контакт. Такое часто бывает с инструментами, ведь все их



Рис. 8.4. Международная космическая станция в свободном полете над Землей.

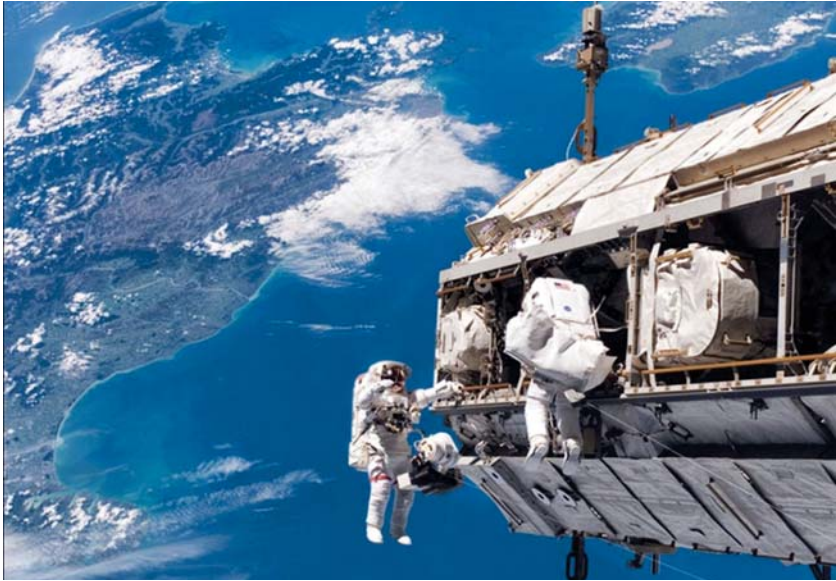


Рис. 8.5. Согласно инструкции, при работе в открытом космосе обязательна двойная страховка.

не привяжешь. Если предмет выпал у космонавта из рук, то он уходит куда-то вдаль и становится самостоятельным спутником Земли.

План работ на МКС включает испытания в открытом космосе индивидуального реактивного ранца. И когда его двигатель отказывает, приливные силы уносят космонавта, и мы его теряем; имена пропавших без вести засекречиваются. Это, конечно, шутка: подобного происшествия пока еще, к счастью, не было. Но такое вполне могло бы произойти! И, возможно, когда-нибудь случится.

Планета-океан

Вернемся к Земле. Это самый интересный для нас объект, и действующие на него приливные силы ощущаются вполне заметно. Со стороны каких небесных тел они действуют? Главное из них — это Луна, потому что она близко. Следующее по масштабу воздействия — Солнце, потому что оно массивное. Остальные планеты тоже оказывают некоторое влияние на Землю, но оно едва ощутимо.

Для анализа внешнего гравитационного воздействия на Землю планету обычно представляют в виде твердого шара, покрытого жидкой оболочкой (рис. 8.7). Это неплохая модель, поскольку у нашей планеты действительно есть подвижная оболочка в виде океана и ат-

мосферы, а все остальное до-
вольно твердое. Хотя земная
кора и внутренние слои име-
ют ограниченную жесткость
и немного поддаются при-
ливному влиянию, их упру-
гой деформацией можно пре-
небречь при расчетах эффек-
та, производимого на океан.

Если в системе центра
масс Земли нарисовать век-
торы приливных сил, то по-
лучим вот такую картину:
поле приливных сил вытяги-
вает океан вдоль оси «Земля—
Луна», а в перпендикулярной ей плоскости прижимает его к цент-
ру Земли (рис. 8.8). Таким образом, планета (во всяком случае, ее по-
движная оболочка) стремится принять форму эллипсоида. При этом
возникают две выпуклости (их называют приливными горбами) на
противоположных сторонах земного шара: одна обращена к Луне,
другая — от Луны, а в полосе между ними, соответственно, возника-
ет впадина.

Более интересная вещь происходит в промежутке — там, где
вектор приливной силы пытается сместить жидкую оболочку вдоль
земной поверхности. И это естественно: если в одном месте вы хоте-
те приподнять море, а в другом месте — опустить, то вам надо пере-
местить воду оттуда сюда. И между ними приливные силы перегоня-
ют воду в «подлунную точку» и в «антилунную точку».



Рис. 8.6. Планета Земля, вид издалека.

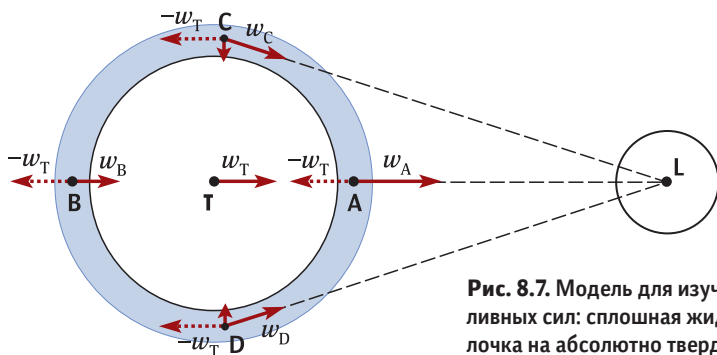


Рис. 8.7. Модель для изучения при-
ливных сил: сплошная жидкая обо-
лочка на абсолютно твердой планете.

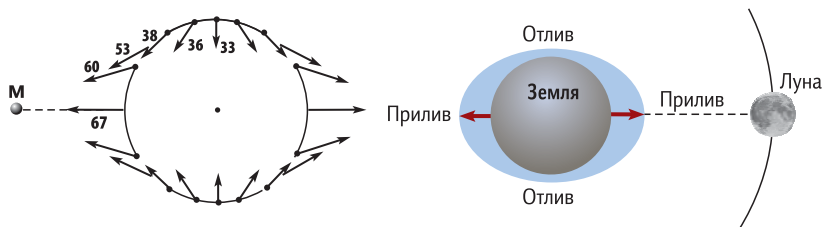


Рис. 8.8. Слева – приливные силы на поверхности сферы, вызванные влиянием массы M ; в разных точках сферы показаны направления векторов силы и указана их абсолютная величина в относительных единицах (из книги Дж. Г. Дарвина «Приливы и родственные им явления в Солнечной системе», М.: Наука, 1965); справа – деформация океана под гравитационным влиянием Луны.

Количественно рассчитать приливный эффект очень просто. С одной стороны, гравитация Земли старается сделать океан шарообразным, с другой – приливная часть лунного и солнечного влияния стремится вытянуть его вдоль оси. Если оставить Землю в покое и дать ей возможность свободно падать на Луну, то высота выпуклости достигла бы примерно полуметра, т. е. океан приподнимается над своим средним уровнем всего-то на полметра. Если вы плывете на пароходе по открытому морю или океану, полметра – это неощутимо. Это называют *статическим приливом*.

Но чтобы создать в подлунной точке полуметровую выпуклость, нужно перегнать туда большое количество воды. А ведь поверхность Земли не остается неподвижной, она по отношению к направлению на Луну и на Солнце быстро вращается, делая полный оборот за сутки (а Луна по орбите идет медленно – один оборот вокруг Земли почти за месяц). Поэтому приливный горб постоянно «бегает» по поверхности океана, так что твердая поверхность Земли за сутки два раза оказывается под приливной выпуклостью и два раза – под отливным понижением уровня океана. Прикинем: 40 тысяч километров (длина земного экватора) в сутки – это 500 метров в секунду. Значит, эта полуметровая волна, типа мини-цунами, набегает на восточные побережья континентов в районе экватора со сверхзвуковой скоростью. На наших широтах скорость достигает 250–300 м/с – тоже довольно много: хоть волна и не очень высокая, за счет инерции она может создать большой эффект.

Почти на каждом экзамене мне попадает студент, который уверенно утверждает, что прилив происходит только на одной стороне Земли – на той, которая обращена к Луне. Как правило, такое

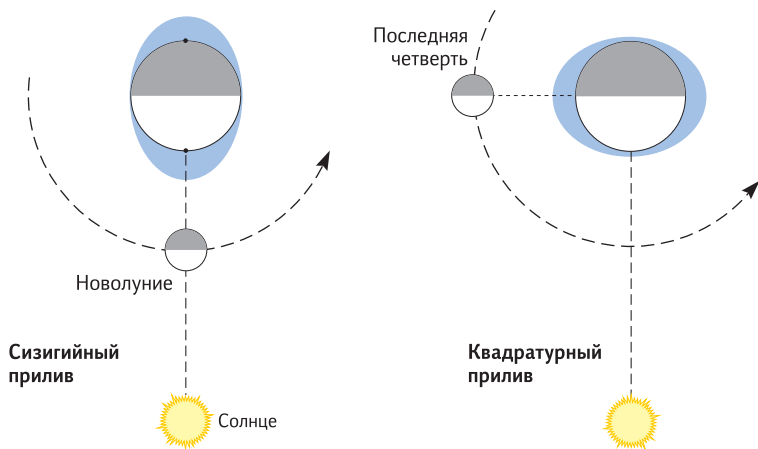


Рис. 8.9. Высота приливов меняется с периодом в две недели.

говорит девушка. Но бывает, хотя и реже, что и юноши в этом вопросе заблуждаются. При этом в целом знания астрономии более глубокие у девушек. Любопытно было бы выяснить причину этой «приливо-гендерной» асимметрии.

Второй объект по масштабу влияния на Землю — это Солнце. Оно в 400 раз дальше от нас, чем Луна, но в 27 млн раз массивнее. Поэтому эффекты от Луны и от Солнца получаются сравнимыми по величине, хотя Луна все же действует чуть сильнее: гравитационный приливный эффект от Солнца примерно в половину слабее, чем от Луны. Иногда их влияние складывается: это происходит в новолуние, когда Луна проходит на фоне Солнца, и в полнолуние — когда Луна находится с противоположной от Солнца стороны. В эти дни — когда Земля, Луна и Солнце выстраиваются в линию, а происходит это каждые две недели — суммарный приливный эффект получается в полтора раза больше, чем только от Луны. А через неделю Луна проходит четверть своей орбиты и оказывается с Солнцем в квадратуре (прямой угол между направлениями на них), и тогда их влияния ослабляют друг друга. В среднем высота приливов в открытом море меняется от 25 до 75 см.

Морякам приливы известны давно. Что делает капитан, когда корабль сел на мель? Если вы читали морские приключенческие романы, то знаете, что он сразу смотрит, в какой фазе Луна, и ждет, когда будет ближайшее полнолуние либо новолуние. Тогда максимальный прилив может поднять корабль и снять его с мели.

Береговые проблемы и особенности

Приливы особенно важны для портовых работников и для моряков, которые собираются ввести свой корабль в порт либо вывести из порта. Как правило, проблема мелководья возникает вблизи берегов, и чтобы она не мешала движению судов, для входа в бухту прорывают подводные каналы — искусственные фарватеры. Их глубина должна учитывать высоту максимального отлива.

Если мы посмотрим в какой-то момент времени на высоту приливов и проведем на карте линии равной высоты воды (рис. 8.11), то получатся концентрические окружности с центрами в двух точках (в подлунной и антилунной), в которых прилив максимален. Если бы орбитальная плоскость Луны совпадала с плоскостью земного экватора, то эти точки всегда бы перемещались по экватору и за сутки (точнее — за $24^{\text{h}} 50^{\text{m}} 28^{\text{s}}$) делали бы полный оборот. Однако Луна ходит не в этой плоскости, а близ плоскости эклиптики, по отношению к которой экватор наклонен на $23,4^{\circ}$. Поэтому подлунная точка «гуляет» также и по широте. Таким образом, в одном и том же порту (т. е. на одной и той же широте) высота максимального прилива, происходящего через каждые 12,5 часов, в течение суток меняется в зависимости от ориентации Луны относительно земного экватора.

Эта «мелочь» важна для теории приливов. Посмотрим еще раз: Земля вращается вокруг своей оси, а плоскость лунной орбиты на-

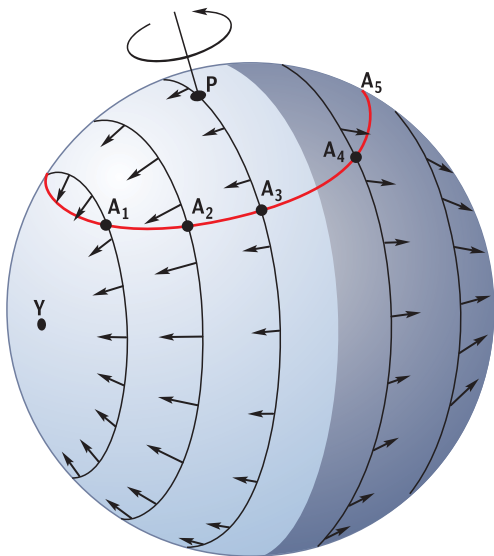


Рис. 8.10. Из-за вращения Земли точка А подвергается периодически меняющимся приливным силам. Стрелками показана горизонтальная проекция приливообразующей силы. Из книги Дж. Г. Дарвина «Приливы и родственные им явления в Солнечной системе», М.: Наука, 1965.

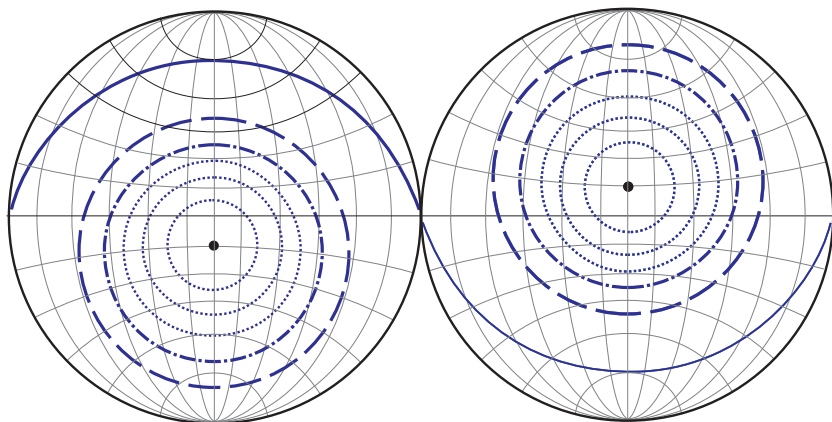


Рис. 8.11. Изолинии статического прилива, когда Луна находится в зените на широте 15° . Из книги Дж. Г. Дарвина «Приливы и родственные им явления в Солнечной системе», М.: Наука, 1965.

клонена к ней. Поэтому каждый морской порт в течение суток «обегает» вокруг полюса Земли, один раз попадая в область максимально высокого прилива, а через 12,5 часов — опять в область прилива, но менее высокого, т. е. два прилива в течение суток не равноценны по высоте. Один всегда больше другого, потому что плоскость лунной орбиты не лежит в плоскости земного экватора.

Для жителей побережья этот эффект жизненно важен. Например, во Франции есть интересный остров, который соединен с материком асфальтовой дорогой, проложенной по дну пролива. На острове живет много людей, но они не могут пользоваться этой дорогой, пока уровень моря высокий (рис. 8.12). По этой дороге можно проехать только два раза в сутки. Люди подъезжают и ждут отлива, когда уровень воды понизится и дорога станет доступной. Жители ездят на побережье на работу и с работы, пользуясь специальной таблицей приливов, которая публикуется для каждого населенного пункта побережья. Если не учитывать это явление, вода по пути может захлестнуть автомобиль. Туристы просто приезжают туда и гуляют, чтобы посмотреть на дно моря, когда нет воды (рис. 8.13), а местные жители что-то при этом собирают со дна, иногда даже для пропитания, т. е. по сути этот эффект кормит людей.

Жизнь вышла из океана благодаря именно приливам и отливам. Некоторые прибрежные животные в результате отлива оказывались на песке и вынуждены были научиться дышать кислородом непо-



Рис. 8.12. Подводная дорога с острова Нуармутье на материк во время прилива и отлива. Фото В. Г. Сурдина.

средственно из атмосферы. Если бы не было Луны, то жизнь, может быть, не так активно выходила бы из океана, потому что там во всех отношениях хорошо — термостатированная среда, невесомость. Но если ты вдруг попал на берег, то надо как-то выживать.

Побережье, особенно если оно плоское, во время отлива сильно обнажается, и на некоторое время люди теряют возможность пользоваться своими плавсредствами, беспомощно лежащими, как киты, на берегу. Но в этом есть кое-что полезное, потому что период отлива можно использовать для ремонта судов, особенно в какой-нибудь бухточке. Например, есть залив Фанди на восточном побережье Канады, в котором, говорят, самые высокие в мире приливы: перепад уровня воды может достигать до 16 метров, что считается рекордом для морского прилива на Земле. Моряки к этому свойству приспособились: во время прилива они подводят судно к берегу, укрепляют его, а когда вода уходит, судно повисает, и ему можно подконопатить дно.

Люди издавна стали следить и регулярно записывать моменты и характеристики высоких приливов, чтобы научиться прогнози-



Рис. 8.13. Дорога с острова Нуармутье во время отлива. Фото В. Г. Сурдина.



Рис. 8.14. Морские приливы в узких заливах значительно выше, чем в открытом море. Прилив и отлив в канадском заливе Фанди.

ровать это явление. Вскоре изобрели *мареограф* — прибор, в котором поплавок ходит вверх-вниз в зависимости от уровня моря, а показания автоматически вычерчиваются на бумаге в виде графика (рис. 8.16). Кстати, средства измерения почти не изменились с момента первых наблюдений и до наших дней.



Рис. 8.15. Лодки во французской бухте во время отлива.

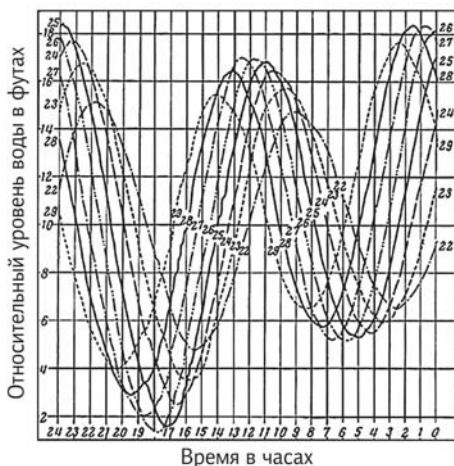
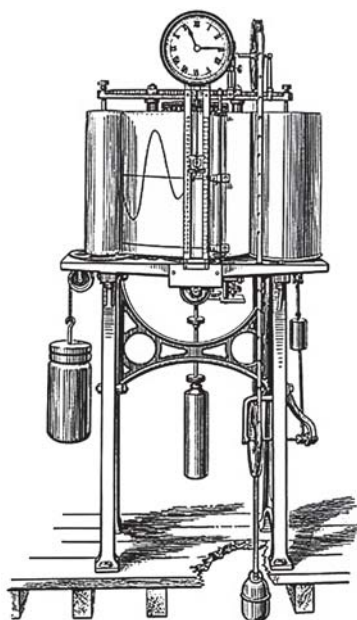


Рис. 8.16. Эскиз мареографа Леже и нарисованная им кривая уровня моря в порту Бомбея от полудня 22 апреля до полудня 30 апреля 1884 г.

На основе большого количества записей гидрографов математики стараются создать теорию приливов. Если имеется многолетняя запись периодического процесса, его можно разложить на элементарные гармоники — синусоиды разной амплитуды с кратными периодами (рис. 8.17) и потом, определив параметры гармоник, продлить суммарную кривую в будущее и на этой основе составить таблицы приливов. Сейчас такие таблицы опубликованы для каждого порта на Земле, и любой капитан, собирающийся войти в конкретный порт, берет для него таблицу и смотрит, когда там будет достаточный для его корабля уровень воды.

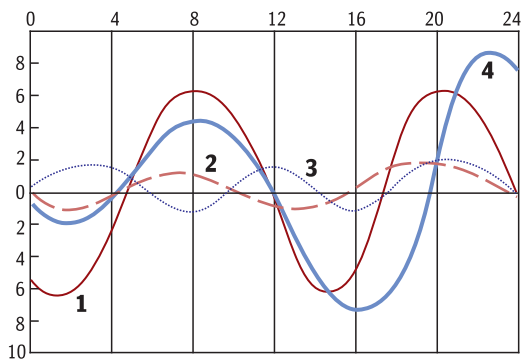


Рис. 8.17. Пример гармонического анализа колебаний уровня моря, в котором временная кривая 4 разложена на три компонента, обусловленные тремя факторами: 1 — лунный прилив; 2 — солнечный прилив; 3 — собственный период колебаний.

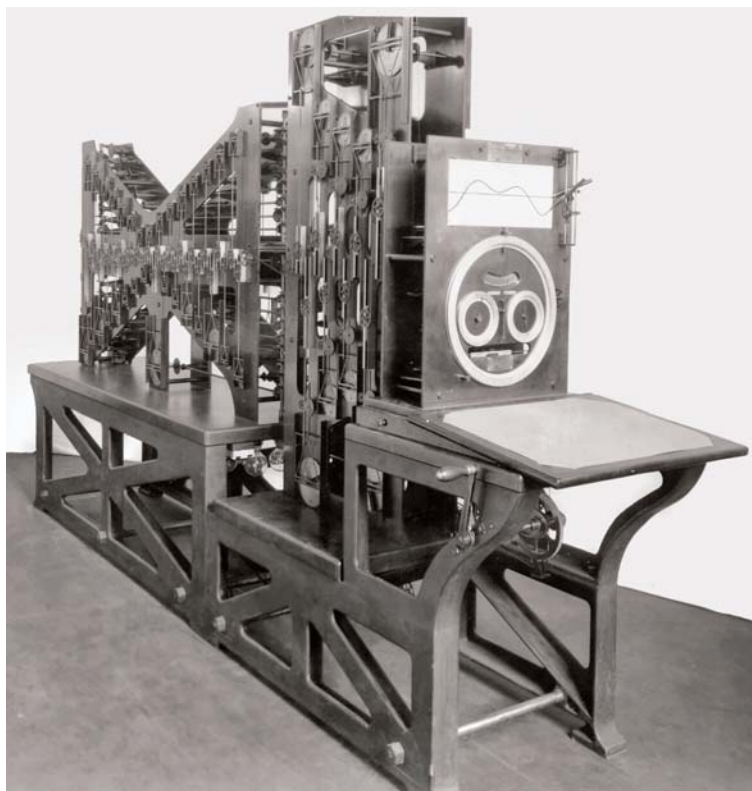


Рис. 8.18. Механическая вычислительная машина для прогноза приливных колебаний уровня моря. Она работала на основе Фурье-анализа многолетних записей уровня воды, имитируя гармонические члены временного ряда вращением барабанов.

Самая известная история, связанная с прогностическими расчетами, произошла во Вторую мировую войну. В 1944 г., когда наши союзники, англичане и американцы, собирались открыть второй фронт против гитлеровской Германии, им нужно было высадиться на французском побережье. Северное побережье Франции очень неудобно для высадки: берег обрывистый, высотой 25–30 метров, а глубина океана невелика, так что корабли могут подойти к берегу только в моменты максимальных приливов. Если бы они сели на мель, их бы просто расстреляли из пушек. Чтобы этого избежать, была создана специальная механическая (электронных тогда еще не было) вычислительная машина (рис. 8.18, 8.19). Она использовала Фурье-анализ временных рядов морского уровня с помощью

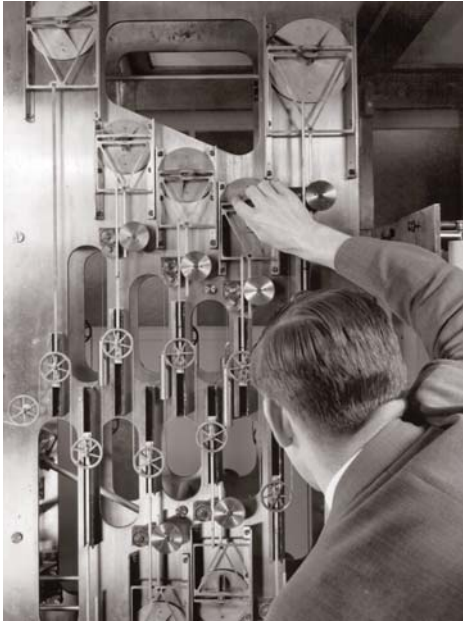


Рис. 8.19. Установка параметров на вычислительной машине.

вращающихся с различной скоростью барабанов, через которые проходил металлический трос, суммирующий все члены ряда Фурье, а связанное с тросом перышко выписывало будущую высоту прилива в зависимости от времени. Это была совершенно секретная работа, которая сильно продвинула теорию приливов, потому что оказалось возможным с достаточной точностью предсказать момент наиболее высокого прилива,

благодаря чему тяжелые военные транспортные корабли прошли Ла-Манш и высадили десант на побережье. Так математики и геофизики сохранили жизнь многим людям.

Некоторые математики стараются обобщить данные в масштабе всей планеты, стремясь создать единую теорию приливов, но сравнивать записи, сделанные в разных местах, трудно, потому что Земля очень неправильная. Это лишь в нулевом приближении единый океан покрывает всю поверхность планеты, а на самом деле есть материки и несколько слабо связанных между собой океанов, причем у каждого океана своя частота собственных колебаний.

Предыдущие рассуждения о колебаниях уровня моря под действием Луны и Солнца касались открытых океанских просторов, где приливное ускорение очень сильно меняется от одного берега к другому. А в локальных водоемах – например, в озерах – может ли прилив создать заметный эффект? Казалось бы, этого не должно быть, ведь во всех точках озера приливное ускорение примерно одинаково, разница маленькая. Например, в центре Европы есть Женевское озеро, оно всего около 70 км в длину и никак не связано с океанами, но люди давно заметили, что там происходят существенные суточные колебания воды. Почему они возникают?



Рис. 8.20. Восточный берег Женевского озера у г. Монтрё (Швейцария).

Да, приливная сила чрезвычайно мала. Но главное — она регулярна, т. е. действует периодически. Все физики знают эффект, который при периодическом действии силы иногда вызывает увеличенную амплитуду колебаний. Например, в столовой вы берете на раздаче тарелку супа и спокойно идете к своему столу, но вдруг суп начинает из тарелки выпрыгивать: это значит, что частота ваших шагов попала в резонанс с собственными колебаниями жидкости в тарелке. Заметив это, мы резко меняем темп ходьбы — и суп «успокаивается». Своя базовая резонансная частота есть у каждого водоема. И чем больше размер водоема, тем ниже частота собственных колебаний жидкости в нем. Так вот, у Женевского озера собственная резонансная частота оказалось кратной частоте приливной силы, и малое приливное влияние «разбалтывает» это озеро так, что на его берегах уровень меняется вполне ощутимо. Эти стоячие волны большого периода, возникающие в замкнутых водоемах, называются *сейшами*.

Энергия приливов

В наше время один из альтернативных источников энергии пытаются связать с приливным эффектом. Как я уже говорил, главный эффект приливов не в том, что вода поднимается и опускается. Главный эффект — это приливное течение, которое за сутки перегоняет воду вокруг всей планеты.

В неглубоких местах этот эффект очень важен. В районе Новой Зеландии через некоторые проливы капитаны даже не рискуют проводить корабли. Парусникам там вообще никогда не удавалось пройти, да и современные корабли проходят с трудом, потому что дно мелкое и приливные течения имеют колоссальную скорость.

Но раз вода течет, эту кинетическую энергию можно использовать. И уже построены электростанции (рис. 8.21–8.24), на которых турбины вращаются туда-сюда за счет приливного и отливного течения. Они вполне работоспособны. Первая приливная электростанция (ПЭС) мощностью 240 МВт была построена во Франции, она до недавних пор была самой крупной в мире. По сравнению с ГЭС – не ахти, конечно, но ближайшие сельские районы она обслуживает.

Чем ближе к полюсу, тем меньше скорость приливной волны, поэтому в России побережий, у которых были бы очень мощные приливы, нет. У нас вообще выходов к морю немного, а побережье Северного Ледовитого океана для использования приливной энергии не особенно выгодно еще и потому, что прилив гонит воду с востока на запад. Но все-таки подходящие для ПЭС места есть, например губа Кислая (рис. 8.24). Дело в том, что в заливах прилив создает всегда больший эффект: волна набегает, устремляется в залив, а он сужается – и амплитуда нарастает. Похожий процесс происходит, если щелкнуть кнутом: сначала длинная волна медленно

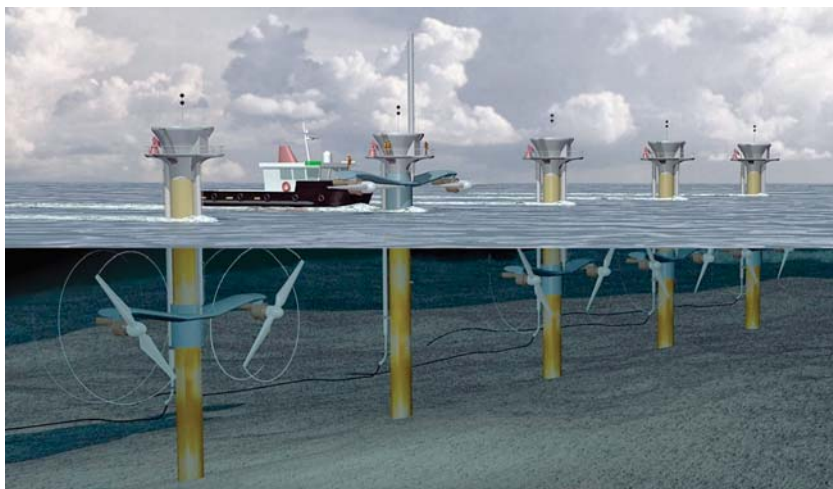


Рис. 8.21. Проект электростанции в неглубоком проливе, использующей энергию приливного течения.



Рис. 8.22. Приливная электростанция «Ля Ранс» в устье реки Ранс вблизи города Сен-Мало (Бретань, Франция).

идет по кнуту, но потом масса вовлеченной в движение части кнута уменьшается, поэтому скорость увеличивается (mv сохраняется!) и, подходя к узкому концу, достигает сверхзвуковой, в результате чего мы слышим щелчок.

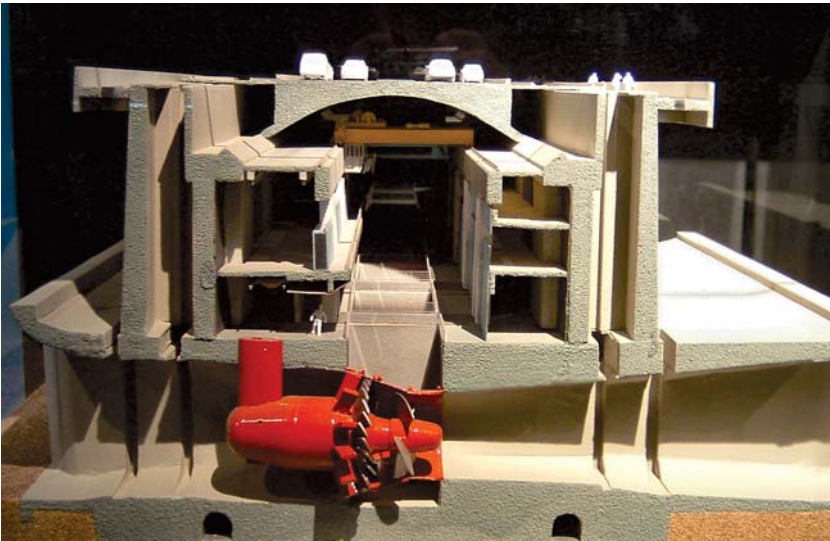


Рис. 8.23. Макет турбинного зала электростанции «Ля Ранс».



Рис. 8.24. Кислогубская ПЭС – единственная в России приливная электростанция. Расположена в 27 км от Мурманска, в губе Кислая Баренцева моря, где высота приливов достигает 5 м. Станция состоит из двух частей: старой, 1968 г., с французским гидроагрегатом мощностью 0,2 МВт, и новой, 2006 г., с отечественным агрегатом на 1,5 МВт. Находится на государственном учете как памятник науки и техники.

Создавая экспериментальную Кислогубскую ПЭС небольшой мощности, энергетики пытались понять, насколько эффективно можно использовать приливы на околополярных широтах для производства электроэнергии. Особого экономического смысла она не имеет. Однако сейчас есть проект очень мощной российской ПЭС (Мезенской) – на 8 гигаватт. Чтобы достичь этой колоссальной мощности, нужно перегородить большой залив, отделив Белое море от Баренцева. Правда, весьма сомнительно, что это будет сделано, пока у нас есть нефть и газ.

Прошлое и будущее приливов

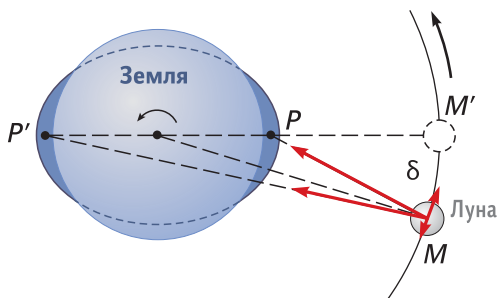
Кстати говоря, из чего черпается энергия приливов? Турбина крутится, электроэнергия вырабатывается, а какой объект теряет при этом энергию?

Поскольку источником энергии прилива служит вращение Земли, а мы черпаем из него, значит, вращение должно замедляться. Казалось бы, у Земли есть внутренние источники энергии (тепло из недр идет благодаря геохимическим процессам и распаду радиоактивных элементов), есть чем компенсировать потери кинетической энергии. Это так, но энергетический поток, распространяясь в среднем практически равномерно по всем направлениям, едва ли может существенно повлиять на момент импульса и изменить вращение.

Если бы Земля не вращалась, приливные горбы смотрели бы точно в направлении Луны и ему противоположном. Но, вращаясь, тело Земли сносит их вперед по направлению своего вращения (рис. 8.25) — и возникает постоянное расхождение приливного пика и подлунной точки в 3–4°. К чему это приводит? Горб, который ближе к Луне, притягивается к ней сильнее. Эта сила притяжения стремится затормозить вращение Земли. А противоположный горб дальше от Луны, он старается ускорить вращение, но притягивается слабее, поэтому равнодействующий момент сил оказывает на вращение Земли тормозящее действие.

Итак, наша планета все время уменьшает скорость своего вращения (правда, не совсем регулярно, скачками, что связано с особенностями массопереноса в океанах и атмосфере). А какое влияние оказывают земные приливы на Луну? Ближняя приливная выпуклость тянет Луну за собой, дальняя — напротив, замедляет. Первая сила больше, в результате Луна ускоряется. Теперь вспомните из лекции № 3, что происходит со спутником, который принудительно тянут вперед по движению. Поскольку его энергия увеличивает-

Рис. 8.25. Сила вязкого трения и инерция тянут приливную волну в направлении вращения Земли (т. е. на восток), в результате чего она приходит чуть позже момента кульминации Луны.



ся, он отдаляется от планеты, а его угловая скорость при этом падает, потому что растет радиус орбиты. Кстати, увеличение периода обращения Луны вокруг Земли было замечено еще во времена Ньютона.

Если говорить о цифрах, то Луна отдаляется от нас примерно на 3,8 см в год, а длительность земных суток каждые сто лет возрастает на сотую долю секунды. Вроде бы ерунда, но вспомните, что Земля существует миллиарды лет. Легко подсчитать, что во времена динозавров в сутках было около 18 часов (нынешних часов, разумеется).

Поскольку Луна отдаляется, приливные силы становятся меньше. Но ведь она удалялась всегда, и если мы обратим взгляд в прошлое, то увидим, что раньше Луна была ближе к Земле, а значит, и приливы были выше. Можете оценить, например, что в архейскую эру, 3 млрд лет назад, приливы были километровой высоты.

Приливы и земная ось

О том, что Земля замедляет свое вращение, вы уже знаете. А ось вращения Земли как-нибудь реагирует на приливное воздействие со стороны Луны и Солнца? До некоторых пор люди думали, что ось вращения Земли прочно «прибита» к небу: один полюс под Полярной звездой, другой – под соответствующей южной звездой, и такое положение дел сохраняется на протяжении всей эволюции планеты. Но это оказалось не так: ориентация земной оси меняется под действием приливного эффекта.

Почему влияние планет вызывает изменение ориентации оси вращения? Дело в том, что Земля – не шар, а эллипсоид. Но это не из-за приливной деформации Земли, величина которой составляет всего полметра. Земля стала эллипсоидом потому, что она быстро крутится и ее растянула центробежная сила: поперек экватора наша планета на 20 км толще, чем вдоль полярной оси. Землю можно представить как некий симметричный шар, на который наложен экваториальный «пояс» или «обруч» – утолщение вдоль экватора, в котором сосредоточен избыток мас-

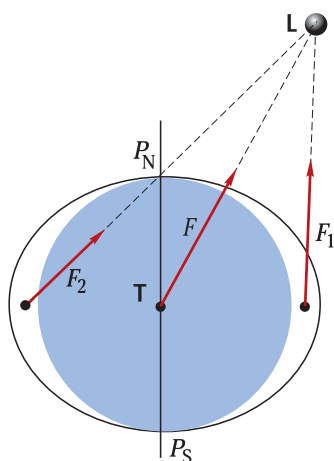
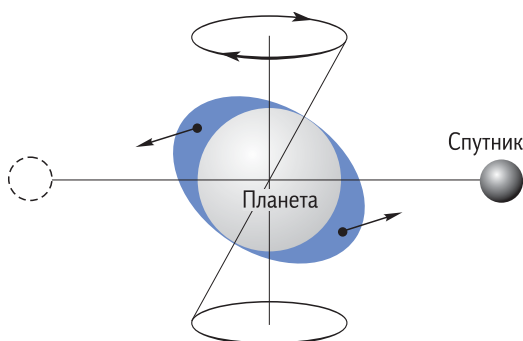


Рис. 8.26. Причина прецессии оси вращения планеты Т – в асимметрии сил, действующих со стороны небесного тела L на экваториальное «вздутие» планеты.

Рис. 8.27. Момент приливных сил, действующих на экваториальное вздутие вращающейся планеты, сохраняет свое направление при любом положении спутника на орбите.



сы. Ближняя его часть сильнее притягивается к Луне, если Луна не в полюсе (а она там никогда не бывает), дальняя — слабее. Эти силы разной величины в разных направлениях относительно центра масс действуют на вращающуюся Землю, и их разница старается так повернуть Землю, чтобы поставить ось ее вращения перпендикулярно лунной орбите. Конечно, это не удастся: Луна слабовата. Однако она обходит Землю по кругу, поэтому к большому моменту импульса добавляется небольшой, действующий в поперечном направлении. Это заставляет ось вращения Земли понемногу прецессировать: земная ось «ходит» по конусу, но угол ее наклона к плоскости орбиты не меняется (рис. 8.28). То же самое происходит у знакомого всем волчка, если его раскрутить: сила тяжести старается опрокинуть его на пол, т. е. положить ось вращения горизонтально, а момент этой силы направлен перпендикулярно оси и перпендикулярно моменту импульса (который всегда направлен вдоль оси вращения). Из-за постоянно действующего поперечного момента сил происходит изменение направления вектора момента импульса (при сохранении его модуля), в результате ось волчка ходит по конусу.

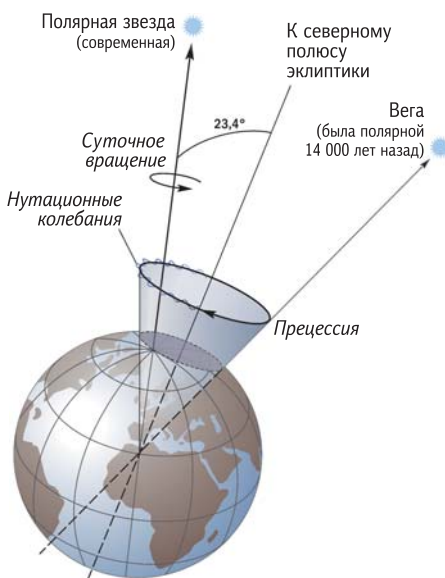


Рис. 8.28. Прецессия земной оси с мелкими нутационными колебаниями.

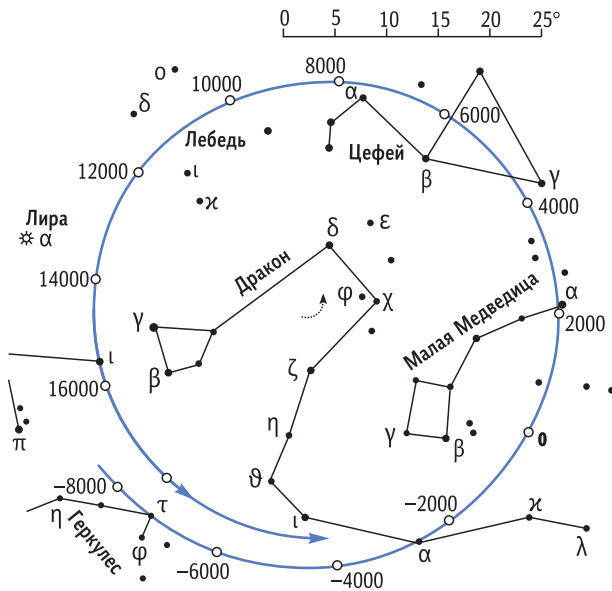


Рис. 8.29. Прецессия Северного полюса мира вокруг оси эклиптики, перпендикулярной орбитальной плоскости Земли. Пунктирная стрелка в центре показывает перемещение полюса эклиптики.

Обратите внимание: прецессия волчка происходит в ту же сторону, куда он вращается, а у Земли — наоборот, в противоположную. Почему? Гравитация старается положить волчок плашмя, а момент сил, действующих со стороны Луны, старается поставить ось вращения перпендикулярно плоскости орбиты, т. е. моменты сил действуют в разных направлениях.

Как проявляется прецессия оси вращения на Земле? Очень просто — полюсы нашего мира «гуляют» по небу с периодом около 26 тыс.

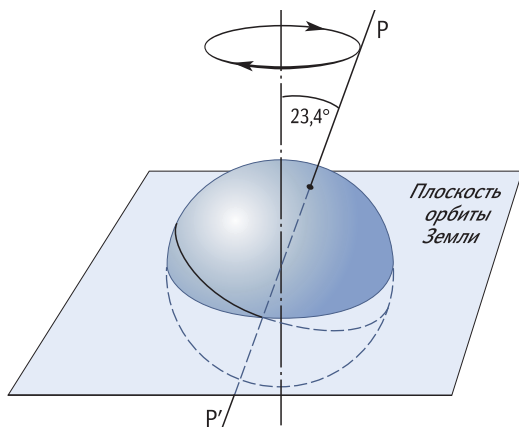


Рис. 8.30. Период общей прецессии земной оси составляет 25 770 лет. Луна и Солнце сдвигают точку весеннего равноденствия к западу: Луна — на 34,5"/год, Солнце — на 15,9"/год. Влияние планет, приводящее к наклону эклиптики, уменьшает величину общей прецессии на 0,105".

лет. Мы с вами этого не замечаем: когда мы были маленькими, нам сказали, что Полярная звезда (Альфа созвездия Малой Медведицы) всегда на севере, и мы в этом убеждаемся. Наши дети тоже будут думать, что ось Земли смотрит на эту звезду, но уже прапрапраправнучки обнаружат, что нет — чуть в сторону. Дальше она будет продолжать гулять и через 14 тыс. лет окажется рядом с Альфой Лиры, известной всем звездой под названием Вега. И для тех, кто будет жить на Земле через 14 тыс. лет, полярной звездой будет служить очень яркая голубоватая Вега. Потом ось продолжит свое движение и через 26 тыс. лет вернется к нынешней невзрачной Полярной звезде (рис. 8.28, 8.29).

Это процесс интересен для историков, которые реконструируют события прошлого. В частности, обсуждался вопрос, как строителям пирамид Египта удавалось их ориентировать четыре тысячелетия назад. Но с того времени земная ось на фоне 26 тысяч лет описала заметную дугу, и нужно учитывать, что во времена древних египтян обозреваемое с той же точки Земли звездное небо было совсем не таким, как сегодня: небесный свод был повернут по-другому, и стороны света смотрели на другие созвездия.

Если внимательно посмотреть на кривую, выписываемую на небе земной осью, то мы увидим, что на нее наложен мелкий тремор (рис. 8.28, 8.31): двигаясь по конусу, ось Земли немного покачивается. Это называется нутационным движением. Оно связано с тем, что под приливным влиянием Солнца плоскость лунной орбиты «гуляет» относительно плоскости эклиптики, вектор действующего на Землю момента сил слегка меняется и ось Земли из-за этого покачивается.

Время от времени в журналистских публикациях проскакивает «сенсация»: какое-то землетрясение или цунами где-нибудь в Японии привело к тому, что сдвинулась земная ось. Как правило, это невероятное вранье. Однако такой эффект — сдвиг оси вращения относительно поверхности планеты — реально су-

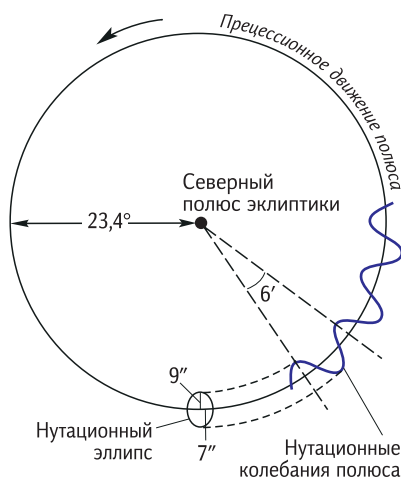


Рис. 8.31. Сложное движение земной оси можно представить как сумму прецессии и нутации.

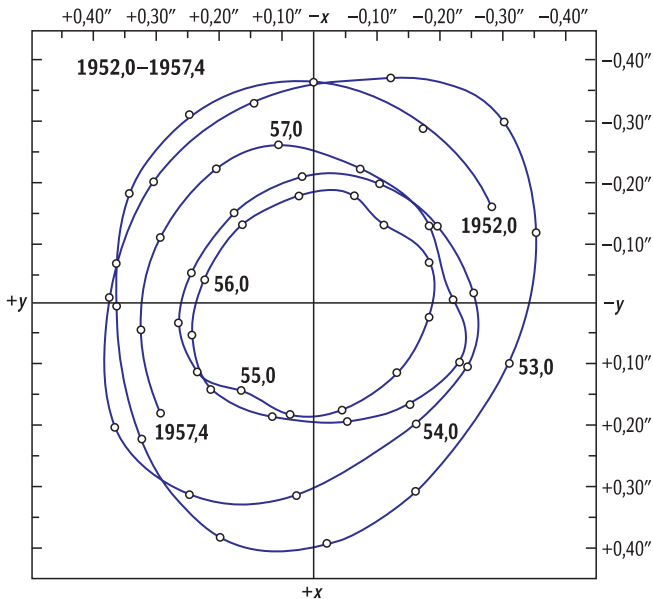


Рис. 8.32. Движение северного географического полюса по поверхности Земли в 1952–1957 гг. Сторона квадрата – 28 м.

ществует. До сих пор мы говорили о поворотах оси вращения относительно небесных тел, а это возможно, только если есть внешний источник момента сил. Но даже если вокруг ничего нет и ось строго соблюдает свою ориентацию в пространстве, в теле Земли эта ось может колыхаться из-за неравномерного распределения массы и течения вещества внутри планеты. Это простой механический эффект, называемый *свободными колебаниями тела на оси вращения*, и в случае Земли он очень слаб. Координаты истинного географического северного полюса – точки, где в Северном Ледовитом океане ось вращения Земли пробивает ледяной купол и выходит в небо, – постоянно меняются: полюс «нарезает круги» около средней точки на расстоянии порядка 10 метров (рис. 8.32).

Приливные явления на других планетах

Разумеется, в системах других планет со спутниками происходят такие же явления. Юпитер, например, – очень массивная планета, у которой большое число спутников (на 2017 г. их известно 79). Четыре его крупнейших спутника (их называют галилеевыми, потому что Галилей их обнаружил) подвергаются влиянию со стороны Юпитера вполне ощутимо. Ближайший из них, Ио, весь покрыт вулканами, среди которых более полусотни действующих, причем они выбрасывают



Рис. 8.33. Юпитер и его крупнейшие спутники. Коллаж из фотографий NASA.

«лишнее» вещество на 250–300 км вверх. Это открытие было весьма неожиданным: на Земле таких мощных вулканов нет, а тут маленькое тело размером с Луну, которое должно было бы остыть уже давно, а вместо этого оно пышет жаром со всех сторон (рис. 8.34). Где источник этой энергии?

Вулканическая активность Ио была сюрпризом не для всех: за полгода до того, как первый зонд подлетел к Юпитеру, два американских геофизика опубликовали работу, в которой они рассчитали приливное влияние Юпитера на этот спутник. Оно оказалось настолько велико, что способно деформировать тело спутника. А при деформации всегда выделяется тепло. Когда мы берем кусок холодного пластилина и начинаем мять его в руках, он становится после нескольких сжатий мягким, податливым. Это происходит не потому, что рука нагрела его своим теплом (точно так же получится, если его плющить в холодных тисках), а потому, что деформация вложила в него механическую энергию, которая преобразовалась в тепловую.

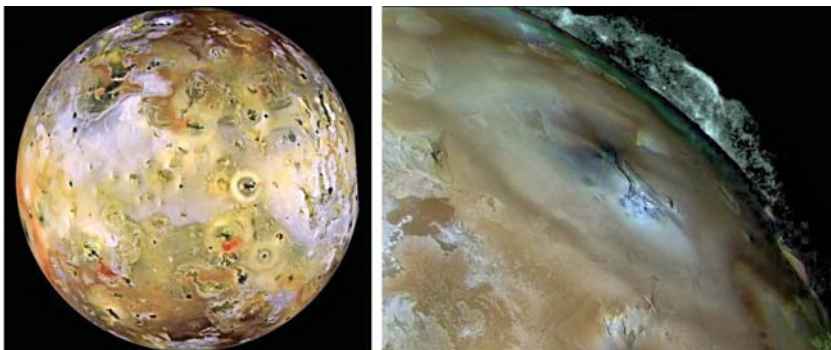
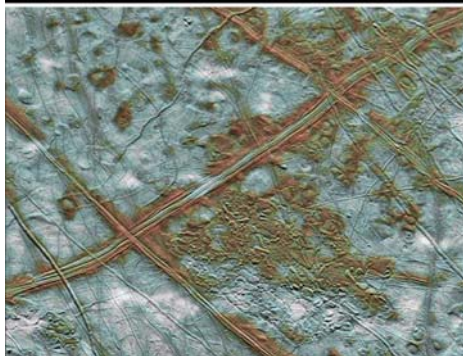


Рис. 8.34. Ио, спутник Юпитера, характеризуется обилием активных вулканов. Справа: на заднем плане происходит извержение. Фото: NASA.

Но почему форма спутника меняется под действием приливов со стороны Юпитера? Казалось бы, стал один раз эллипсоидом, двигаясь по круговой орбите и синхронно вращаясь, как наша Луна, — и нет повода для последующих искажений формы. Однако рядом с Ио есть и другие спутники, и все они заставляют ее орбиту немного смещаться туда-сюда: Ио то приближается к Юпитеру, то удаляется. Значит, приливное влияние то ослабевает, то усиливается, и форма тела все время меняется.



Раньше мы не упоминали о приливах в твердом теле Земли, но они, конечно, тоже есть, правда, не очень высокие — порядка 10 см. Если вы посидите часов шесть на своих местах, то благодаря приливам сантиметров на двадцать «погуляете» относительно центра Земли. Это колебание для человека, конечно, неощутимо, но геофизические приборы его регистрируют.

Раньше мы не упоминали о приливах в твердом теле Земли, но они, конечно, тоже есть, правда, не очень высокие — порядка 10 см. Если вы посидите часов шесть на своих местах, то благодаря приливам сантиметров на двадцать «погуляете» относительно центра Земли. Это колебание для человека, конечно, неощутимо, но геофизические приборы его регистрируют.

Рис. 8.35. Европа, спутник Юпитера: общий вид и трещины в ледяной коре. Фото: NASA.

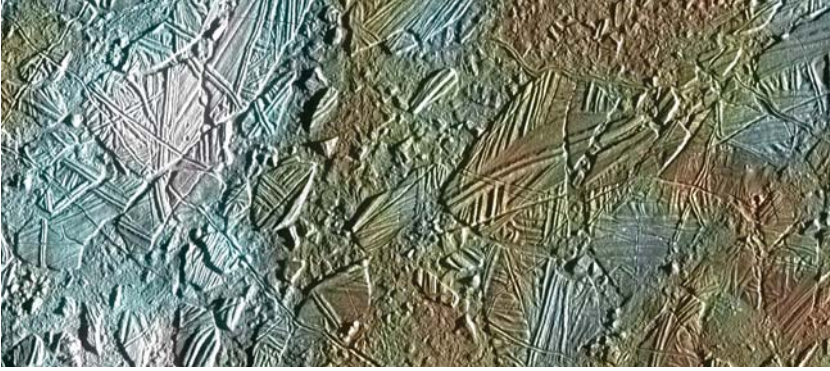


Рис. 8.36. Ледяные торосы на Европе.

В отличие от земной тверди, поверхность Ио за каждый орбитальный период колеблется с многокилометровой амплитудой. Большая энергия деформации рассеивается в виде тепла и нагревает недра. На поверхности, кстати, не видно метеоритных кратеров, потому что вулканы постоянно забрасывают всю поверхность свежим веществом. Стоит ударному кратеру образоваться, как лет через сто его засыпают продукты извержения соседних вулканов. Работают они непрерывно и очень мощно, к этому добавляются разломы в коре планеты, через которые из недр вытекает разное вещество, в основном сера. При высокой температуре она темнеет, поэтому струя из кратера выглядит черной. А светлый ободок вулкана — остывшее вещество, которое опадает вокруг. На нашей планете выброшенное из вулкана вещество обычно тормозится воздухом и падает близко к жерлу, образуя конус, а на Ио атмосферы нет, и оно летит по баллистической траектории далеко во все стороны. Пожалуй, это пример самого мощного приливного эффекта в Солнечной системе.

Второй спутник Юпитера, Европа, весь выглядит как наша Антарктида: он покрыт сплошной ледяной коркой, кое-где потрескавшейся (рис. 8.35, 8.36), так как ее тоже что-то постоянно деформирует. Поскольку этот спутник подальше от Юпитера, приливный эффект здесь не так силен, но тоже вполне ощутим. Под этой ледяной корой — жидкий океан: на отдельных снимках видно, как из некоторых разошедшихся трещин бьют фонтаны. Под действием приливных сил океан бурлит, а на его поверхности плавают и сталкиваются ледяные поля, почти как у нас в Северном Ледовитом океане и у берегов Антаркти-

ды. Измеренная электропроводность жидкости океана Европы свидетельствует о том, что это соленая вода. Почему бы там не быть жизни? Заманчиво было бы опустить в одну из трещин прибор и посмотреть, кто там живет.

На самом деле не для всех планет концы с концами сходятся. Например, у Энцелада, спутника Сатурна, тоже есть ледяная кора и океан под ней. Но расчеты показывают, что энергии приливов недостаточно, чтобы поддерживать подледный океан в жидком состоянии. Конечно, кроме приливов у любого небесного тела есть и другие источники энергии — например, распад радиоактивных элементов (урана, тория, калия), но на малых планетах они едва ли могут играть значимую роль. Значит, чего-то мы пока не понимаем.

Приливный эффект чрезвычайно важен для звезд. Почему — об этом в следующей лекции.

