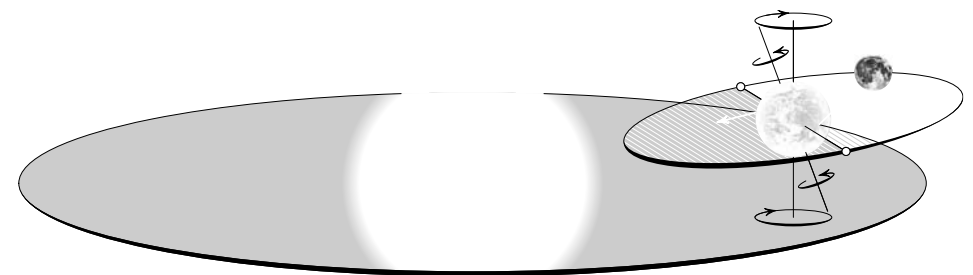
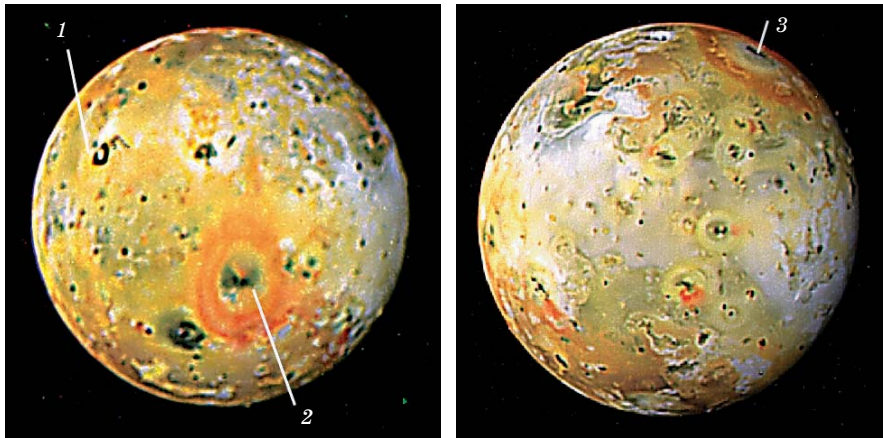


В. Г. Сурдин

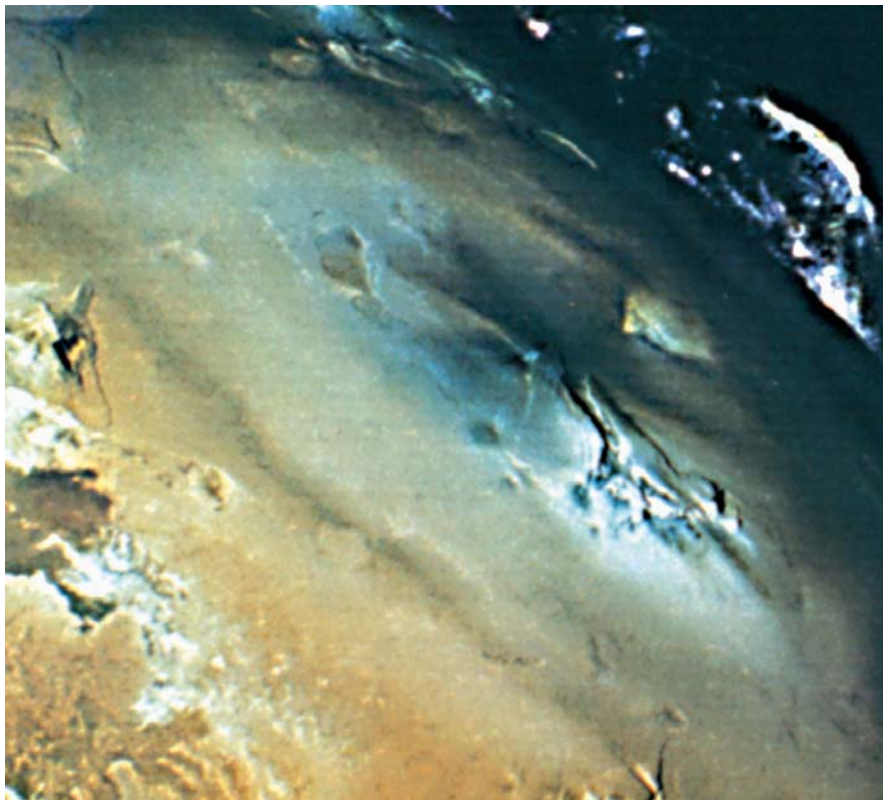
ПЯТАЯ СИЛА



Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
Москва • 2002



Действующие вулканы на поверхности спутника Юпитера Ио — единственного из спутников планет Солнечной системы, имеющего раскалённые недра. Источником энергии, необходимой для этого, являются приливные деформации в гравитационном поле Юпитера. 1 — влк. Локи, 2 — влк. Пеле, 3 — влк. Тваштар.



Библиотека
«Математическое просвещение»
Выпуск 17

В. Г. Сурдин

ПЯТАЯ СИЛА

Научно-редакционный совет серии:

*В. В. Прасолов, А. Б. Сосинский,
В. М. Тихомиров (гл. ред.), И. В. Яценко.*

Серия основана в 1999 году.

Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
Москва • 2002

УДК 524
ББК 22.67
С90

Аннотация

Среди четырёх фундаментальных сил природы — гравитационной, электромагнитной, сильной и слабой ядерных — приливной силы нет. Тем не менее, вызванные приливными силами эффекты влияют на движение планет, звёзд и галактик, расположение созвездий, на погоду, навигацию, на рост растений и эволюцию биосферы. Даже идея создания машины времени, которую можно было бы осуществить, используя чёрные дыры, наталкивается на почти непреодолимое препятствие — приливные силы.

Брошюра написана по материалам лекции «Приливные силы на Земле и в космосе», прочитанной автором 1 декабря 2001 года на Малом мехмате МГУ для школьников 9—11 классов.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся физикой, астрономией, математикой: школьников старших классов, студентов, учителей...

*Издание осуществлено при поддержке
Московской городской Думы
и Московского комитета образования.*

ISBN 5-94057-027-5

© Сурдин В. Г., 2002.
© МЦНМО, 2002.

Сурдин Владимир Георгиевич.

Пятая сила.

(Серия: «Библиотека „Математическое просвещение“»).
М.: МЦНМО, 2002. — 40 с.: ил.

Редакторы Р. О. Алексеев, К. С. Коршунов.

Техн. редактор М. Ю. Панов.

Лицензия ИД № 01335 от 24/III 2000 года. Подписано к печати 22/IV 2002 года.
Формат бумаги 60 × 88 ¹/₁₆. Offsetная бумага № 1. Offsetная печать. Физ. печ. л. 2,50.
Усл. печ. л. 2,44. Уч.-изд. л. 2,74. Тираж 3000 экз. Заказ 1361.

Издательство Московского центра непрерывного математического образования.
121002, Москва, Г-2, Бол. Власьевский пер., 11. Тел. 241 05 00.

Отпечатано в ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ».
140010, г. Люберцы Московской обл., Октябрьский пр-т, 403. Тел. 554 21 86.

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ПЯТАЯ СИЛА?

Физикам известны четыре фундаментальных силы — гравитационная, электромагнитная, сильная ядерная и слабая ядерная. Однако не следует забывать и о ещё одной силе — приливной. Разумеется, это не самостоятельная физическая сила, а лишь характерное проявление каждой из упомянутых четырёх в тех случаях, когда нельзя пренебрегать конечным размером объектов взаимодействия. Правильнее было бы называть это явление не «приливной силой», а «приливным эффектом»; однако наблюдаемые в природе приливные явления порой столь неожиданны и важны, при этом они столь часто остаются забытыми или непонятыми, что физики с полным правом называют приливное взаимодействие «пятой силой», а математики развивают специальные методы для исследования приливных эффектов.

В принципе, можно было бы сформулировать все законы и правила физики, не упоминая о различных нефундаментальных силах. Например, говоря о молекулярных взаимодействиях, можно пользоваться только понятием об электромагнитной силе, но это значительно усложнит расчёты. Введение полуэмпирическим путём ван-дер-Ваальсовой силы, которая на некотором интервале расстояний между атомами или молекулами весьма точно описывает закон электромагнитного взаимодействия между ними, позволяет существенно упростить расчёты, проводить «в уме» качественные рассуждения, проще и быстрее получать необходимые результаты.

То же самое можно сказать и о силах инерции, например, о кориолисовой силе. Вспоминая о том, в каком полушарии Земли какой берег подмывает река (закон Бэра) или в какую сторону закручивается атмосферный циклон, проще воспользоваться правилом для кориолисовой силы, чем рассуждать о том, как взаимодействует движущаяся вода или атмосферный воздух с вращающейся Землёй.

Чтобы ощутить всю важность приливных эффектов, проведём такой, разумеется, мысленный, эксперимент: предположим, вы с приятелем поднимаетесь в плотно закрытом лифте, вдруг канат обрывается и кабина начинает свободно падать (рис. 1). Пусть сопротивление воздуха и прочие помехи свободному падению отсутствуют. Ваш приятель, плавая по кабине в состоянии невесомости, высказывает гипотезу, что лифт неожиданно оказался в космическом пространстве, вдали от планет, звёзд и прочих источников тяготения. Сможете ли вы экспериментально доказать ему, что в действительности лифт свободно падает вблизи поверхности Земли? Казалось бы, доказать это невозможно: согласно принципу эквивалентности, на котором держится теория гравитации Эйнштейна, наличие поля тяготения равносильно ускоренному движению системы отсчёта,

а свободное падение в гравитационном поле «нейтрализует» действие этого поля.

Действительно, этот принцип справедлив, т. е. экспериментально проверен с высочайшей точностью, но лишь в малой окрестности изучаемой точки, либо в сопутствующей (деформирующейся) системе

координат. Если же система координат жёстко связана, например, со стенками кабины лифта, то вы без труда докажете приятелю, что лифт свободно падает вблизи тяготеющей массы. Для этого достаточно продемонстрировать, что две пробные массы, размещённые в покое у противоположных стенок кабины, начинают ускоренно сближаться. Подозрение в том, что они сближаются под действием собственного тяготения, легко может быть опровергнуто тем, что помещённые у пола и потолка кабины, эти же массы начинают удаляться друг от друга (см. рис. 1).

Как видим, попытка скрыть присутствие гравитационного поля не удалась: наличие поля выдал приливный компонент его силы. После этого опыта трудно утверждать, что приливной силы не существует.

Итак, приливные силы выходят на сцену в тех случаях, когда распределение ускорений, обусловленное взаимодействием, неоднородно в пространстве. Если в этой области пространства находится объект конечного размера, то разные его точки

Рис. 1. В свободно падающей кабине лифта нет полной невесомости: в ней заметно действие приливного эффекта.

будут испытывать разное ускорение, что приведёт к деформации объекта: в твёрдом теле при этом возникнут внутренние напряжения, а у жидкого или газообразного тела одни его части начнут перемещаться относительно других. Именно это и происходит, когда морская вода опускается и поднимается у побережья вследствие движения Земли в неоднородных гравитационных полях Луны и Солнца. Как наиболее древний из знакомых людям эффектов подобного рода, морские приливы дали своё название всему классу *приливных явлений* [3, 10].

ПРИЛИВЫ — ЭТО СЕРЬЁЗНО

Знакомство с приливами начнём с нашей планеты, где они изучены наиболее полно. Все жители морских побережий сталкивались с приливами, но в каждой области приливы имеют свой «характер»: где-то они едва заметны, а в некоторых местах их циклом полностью определяется жизнь людей и животных.

Как правило, чем крупнее водоём, тем сильнее в нём приливы. В Средиземном море они едва заметны, а в Атлантике очень сильны; например, в проливе Ла-Манш высота приливов достигает 15 м. Казалось бы, наибольших приливов следует ожидать в Тихом океане — крупнейшем бассейне планеты. Но в целом для Тихого океана приливы невысоки. Исключение составляет залив Кука на Аляске, славящийся исключительно большим подъёмом воды во время приливов и уступающий в этом отношении только заливу Фанди на северо-западе Атлантического океана (рис. 2), где уровень воды колеблется с рекордной амплитудой — 18 м!

Умение заранее рассчитать моменты и высоту подъёма воды у берегов, особенно в бухтах, где расположены порты, играет важную роль для мореплавания: при сильном отливе судно может сесть на мель и повредить себе днище. Заход крупных судов во многие морские порты возможен только в период высокой воды. Учёт приливов необходим и для плавания в устьях крупных рек, впадающих в океан. В эпоху парусных судов особенно важно было правильно учитывать течение воды, связанное с приливо-отливным циклом: с началом прилива кораблю удобно входить в порт, а с началом отлива — выходить в открытое море. Поэтому в крупных портах уже давно были организованы наблюдения за колебанием уровня воды и предпринимались прогнозы приливов и отливов (рис. 3, 4).

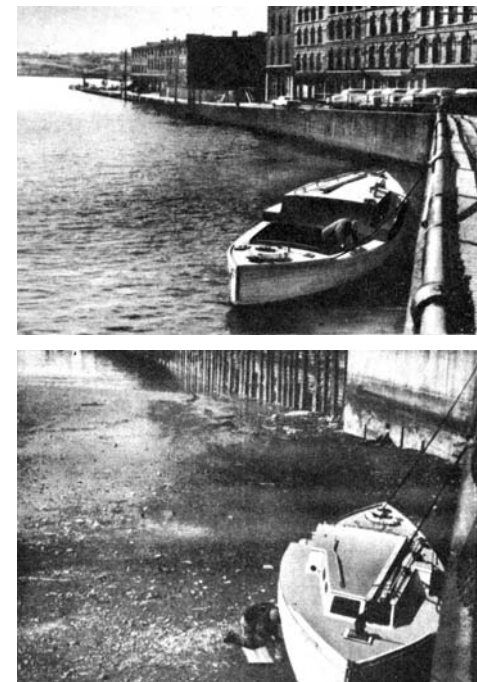


Рис. 2. Прилив и отлив в заливе Фанди (Канада).

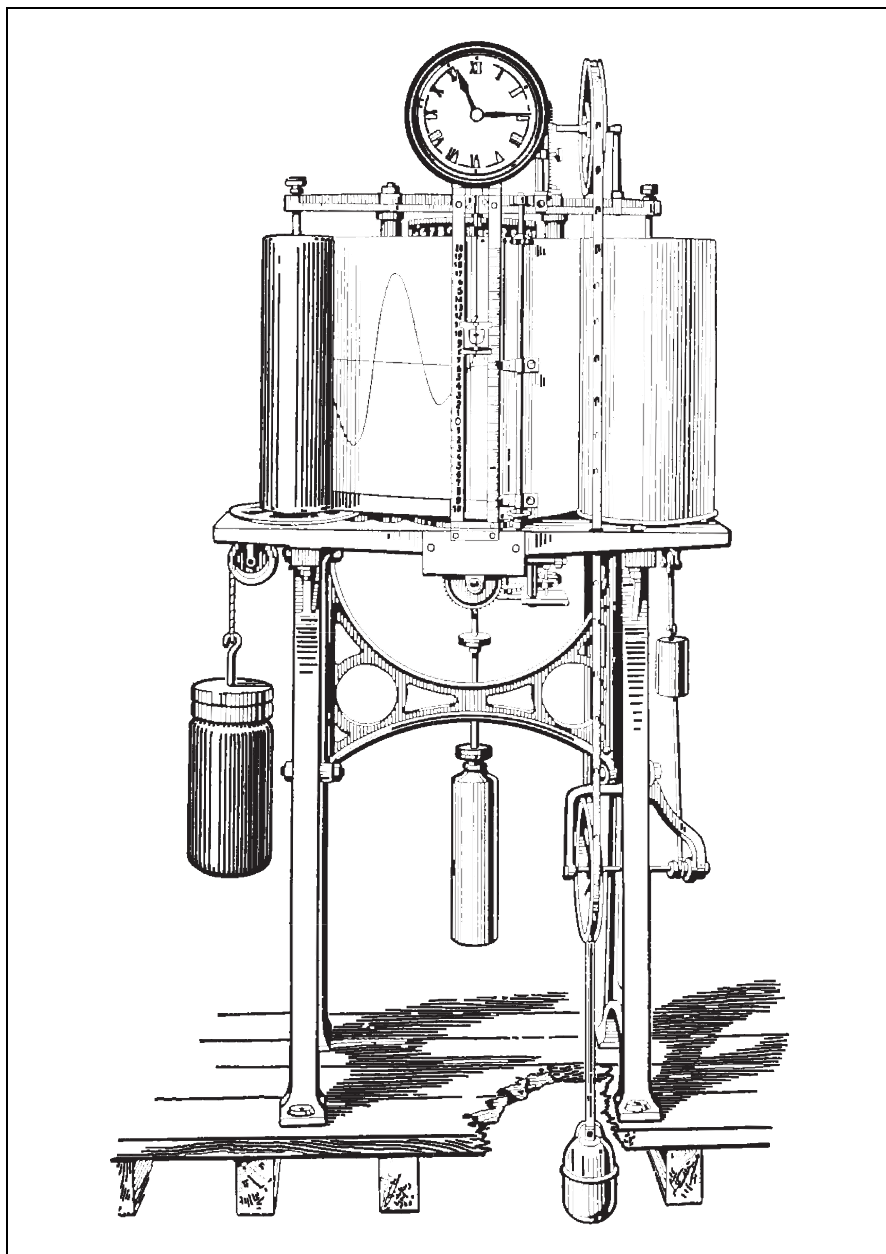


Рис. 3. Мореограф Лежэ — простой механический прибор для автоматической регистрации уровня воды у берега [3].

Однако приливы важны не только для моряков. Даже в нашу эпоху, когда приливы на Земле сравнительно слабы (о предшествующих эпохах речь пойдёт впереди), они определяют некоторые природные явления. Например, все знают, какую важную роль для климата Северной Европы играет тёплое атлантическое течение Гольфстрим.

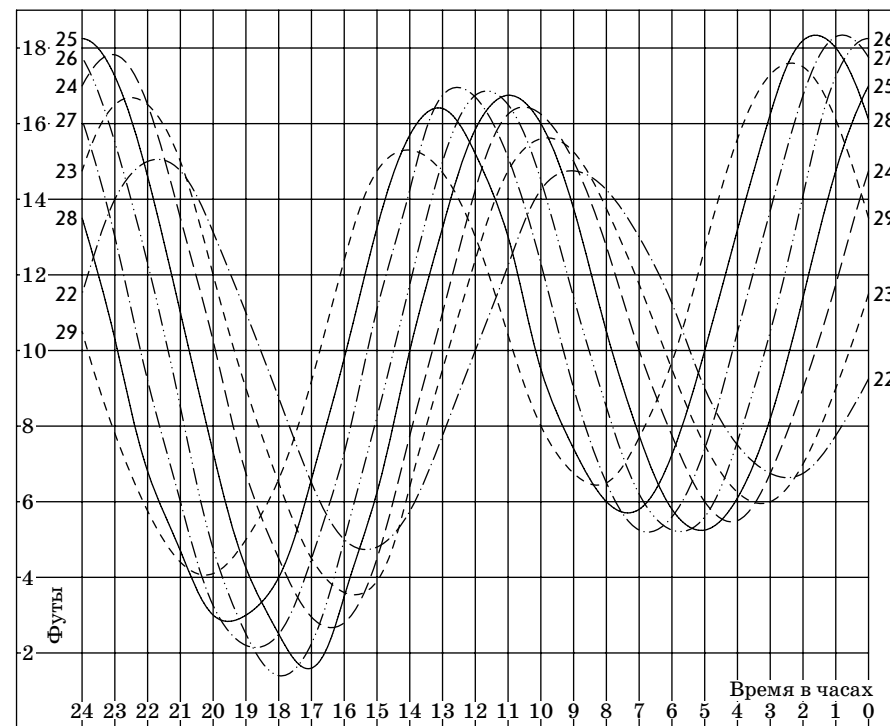


Рис. 4. Колебания уровня воды в порту Бомбея от полудня 22 апреля до полудня 30 апреля 1884 г. [3].

Однако, когда тёплые и солёные воды Атлантики входят в Северный Ледовитый океан, они погружаются под его холодные, но менее солёные воды. Так бы и сгнуло тепло, принесённое Гольфстримом из тропических широт, если бы не приливы: сильное приливное перемешивание переносит тёплую воду к поверхности, и она согревает воздух над Северной Европой.

Итак, убедившись в важности приливов, спросим себя — в чём причина приливного эффекта? Качественный ответ мы уже знаем: причина в неоднородности гравитационного поля. Теперь опишем это явление количественно.

ТЕОРИЯ ПРИЛИВОВ

Степень неоднородности гравитационного поля, создаваемого массой m на расстоянии r от неё, можно оценить, используя обычную формулу для гравитационного ускорения:

$$\vec{a}(\vec{r}) = -\frac{Gm}{r^3}\vec{r}.$$

Выделим на расстоянии r точку A и определим, на сколько отличается ускорение в точках, удалённых от неё на расстояние Δr ($\Delta r \ll r$). Используем для этого операцию дифференцирования ($\Delta a/\Delta r$) или, в крайнем случае, разложение с помощью бинома Ньютона ($\vec{a}(\vec{r} + \Delta\vec{r}) \sim (r + \Delta r)^{-2}$). Окажется, что если точка лежит на прямой AB (рис. 5), то разница в ускорениях равна

$$\Delta a = \frac{2Gm}{r^3}\Delta r$$

и направлена вдоль этой же прямой; а если точка лежит в плоскости, перпендикулярной этому направлению, то

$$\Delta a = \frac{Gm}{r^3}\Delta r$$

и направлена перпендикулярно прямой AB . О промежуточных случаях даёт представление рис. 5. Таким образом, если поместить в точку A какое-либо протяжённое тело, то приливные силы будут стараться растянуть его вдоль оси, совпадающей с направлением на возмущающую массу, и сжать в направлениях, перпендикулярных этой оси.

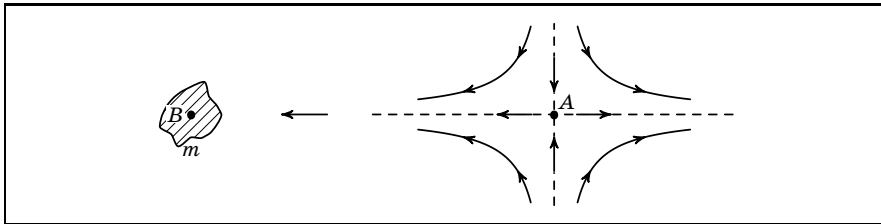


Рис. 5. Направление приливных сил в окрестности произвольной точки A , находящейся вблизи массы m .

Степень неоднородности гравитационного поля $\Delta a/\Delta r$ (или *градиент поля*) измеряют с помощью специальных приборов — градиентометров. Чувствительность градиентометров, как правило, составляет порядка 10^{-7} с^{-2} , а у лучших их лабораторных образцов — порядка 10^{-9} с^{-2} . Последнее значение даже получило специальное обозначение как единица измерения градиента гравитационного поля: $10^{-9} \text{ с}^{-2} = 1$ Этвеш (в честь известного венгерского физика Р. Этвеша). Чтобы оценить величину приливных сил вблизи поверхности

некоторых космических тел, обратимся к табл. 1, где ускорение силы тяготения и градиент поля $\Delta a/\Delta r$ даны с помощью величины ускорения силы тяжести на поверхности Земли $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Таблица 1

Характеристики гравитационного поля
на поверхности некоторых космических объектов

Космическое тело	Масса ($M_\odot$)	Радиус*)	Поле тяготения (g)	Градиент поля ($g/\text{м}$)
Луна	$4 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-3}$	0,17	$2 \cdot 10^{-7}$
Земля	$3 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-3}$	1	$3 \cdot 10^{-7}$
Юпитер	$1 \cdot 10^{-3}$	0,1	2,5	$7 \cdot 10^{-8}$
Солнце	1	1	27	$8 \cdot 10^{-8}$
Красный сверхгигант	15	400	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-14}$
Белый карлик	0,8	0,01	$2 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^{-2}$
Нейтронная звезда	2	20 км	$7 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^6$
Чёрная дыра**)	5	15 км	$3 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^7$
Чёрная дыра**)	10^8	428	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-7}$
Галактика внутри орбиты Солнца	$2 \cdot 10^{11}$	10 кпк	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-28}$

*) Если не указана единица измерения радиуса, он измеряется в Солнечных радиусах ($R_\odot$).

**) Для чёрной дыры имеется в виду гравитационный радиус $r_g = 2GM/c^2$.

Подчеркнём, что приливное ускорение нельзя «нейтрализовать» никакой невесомостью: даже в свободно пролетающем вблизи поверхности нейтронной звезды космическом аппарате приливные силы разрушат все приборы да и сам аппарат тоже, если его размеры будут превышать 10 см.

Обычно, говоря о приливных эффектах, одно тело называют *возмущающим*, а другое — *возмущённым*. Деление это, конечно, условное. Если нас интересуют приливы в океанах Земли, то возмущённым телом будет Земля, а возмущающими — Луна и Солнце; если же мы интересуемся приливами в лунной коре, то уже Луну считаем возмущённым телом, а Землю — возмущающим (влияние Солнца при этом относительно невелико).

Если небесное тело или одна из его оболочек (атмосфера, гидросфера и т. п.) легко поддаётся деформации, то под действием приливной силы их форма изменяется: сферическое тело или какая-либо из его оболочек принимает форму, близкую к вытянутому эллипсоиду. Подчёркивая отличие небесного тела от сферы, иногда говорят, что у него образовались приливные выступы, или горбы. Чтобы оценить степень вытянутости эллипсоида (т. е. относительную высоту приливных горбов), сравнивают приливное ускорение и ускорение силы

тяготения на поверхности возмущённого тела. Отношение этих ускорений равно $2\frac{m}{M}\left(\frac{R}{r}\right)^3$, где M и R — масса и радиус возмущённого тела, m — масса возмущающего тела и r — расстояние между телами. Если для планет, звёзд, галактик эта величина близка к единице, то они заметно изменяют свою форму и могут даже разрушаться (табл. 2).

Таблица 2
Изменение формы под действием приливов

Возмущающий объект	Возмущённый объект	$\frac{m}{M}$	$\frac{R}{r}$	Относительное изменение формы $\Delta R/R$
Земля	Луна	81,3	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Луна	Земля	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
Солнце	Венера	$4,1 \cdot 10^5$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Венера	Солнце	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$
Юпитер	Ио	$2,6 \cdot 10^4$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Ио	Юпитер	$3,8 \cdot 10^{-5}$	0,17	$4 \cdot 10^{-7}$
Нейтронная звезда	Нормальная звезда	1	0,3	0,06
Нормальная звезда	Нейтронная звезда	1	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-15}$
Галактика	БМО	30	0,1	0,06
БМО	Галактика	0,03	0,3	$2 \cdot 10^{-3}$

В общем случае рассчитать приливное воздействие сложно. Обычно рассматривают некоторые предельные ситуации. Например, возмущающее тело принимается за точку, а возмущённое — за однородный эллипсоид, состоящий из несжимаемой жидкости и поэтому легко изменяющий свою форму, но не объём. Такая модель способна описать поведение спутников и небольших планет под действием приливных сил, но не годится в случае планет-гигантов и звёзд, плотность которых сильно увеличивается к центру. В этом случае в качестве упрощающей модели используют приближение тела точечной массой, окружённой невесомой оболочкой.

Решая задачу о приливном воздействии, важно знать как изменяется со временем расстояние между телами и их взаимная ориентация. Если они не изменяются или меняются очень медленно, то говорят о *статических*, или равновесных приливах. Если же тела сблизилась на короткое время и вновь удалились друг от друга, то задачу о приливах решают в *импульсном приближении*, т. е. считают, что за время сближения приливные ускорения успели изменить лишь скорости частиц возмущённого тела, но не успели существенно деформировать его. Статическими можно считать приливы на поверхности синхронно вращающихся двойных звёзд или, например,

земные приливы на Луне. Импульсное приближение обычно используют при исследовании столкновений или близких пролётов в случае галактик, звёздных скоплений, кратных звёздных систем.

Задачу о статических приливах можно упростить, если считать (как мы это и делали), что расстояние между телами значительно превышает их собственные размеры. Такую задачу в конце XIX в. рассмотрел американский астроном Дж. Хилл. Он показал, что однородное тело из несжимаемой жидкости в поле приливных сил принимает форму эллипсоида, вытянутого вдоль направления на возмущающее тело (рис. 6). Если же два тела обращаются вокруг общего центра масс по круговой орбите, то на их форму, помимо приливных сил, влияют и центробежные силы, которые стремятся растянуть тела в плоскости их вращения. Это приводит к тому, что в первом приближении форма жидких тел описывается трёхосным эллипсоидом, малая ось которого перпендикулярна орбитальной плоскости. Однако если размеры тел сравнимы с расстоянием между ними, то их форма становится ещё более сложной — грушевидной.

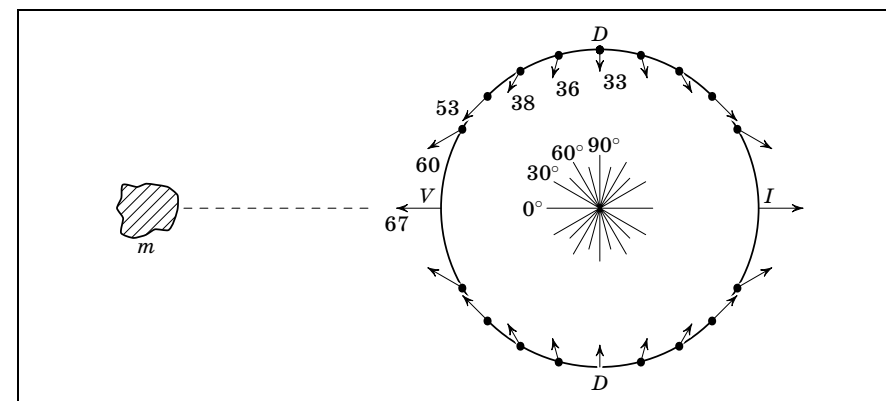


Рис. 6. Распределение приливной силы по поверхности планеты в сечении, проходящем через направление на возмущающее тело (m). Цифры указывают относительное значение силы.

Впервые задачу о форме взаимно обращающихся тел решил в 1847—1850 гг. французский астроном Э. Рош. Он вычислил, какова будет форма жидкого несжимаемого спутника, движущегося по круговой орбите вокруг точечного массивного тела. Оказалось, что поверхность спутника (форму, которую она примет, обычно называют *поверхностью Роша*) остаётся замкнутой, если средняя плотность вещества спутника ρ больше $3,5M/r^3$, где M и r — масса центрального тела и радиус орбиты спутника. В случае невыполнения этого условия замкнутой поверхности не существует: сила тяготения спутника не может победить разрушающее действие приливных

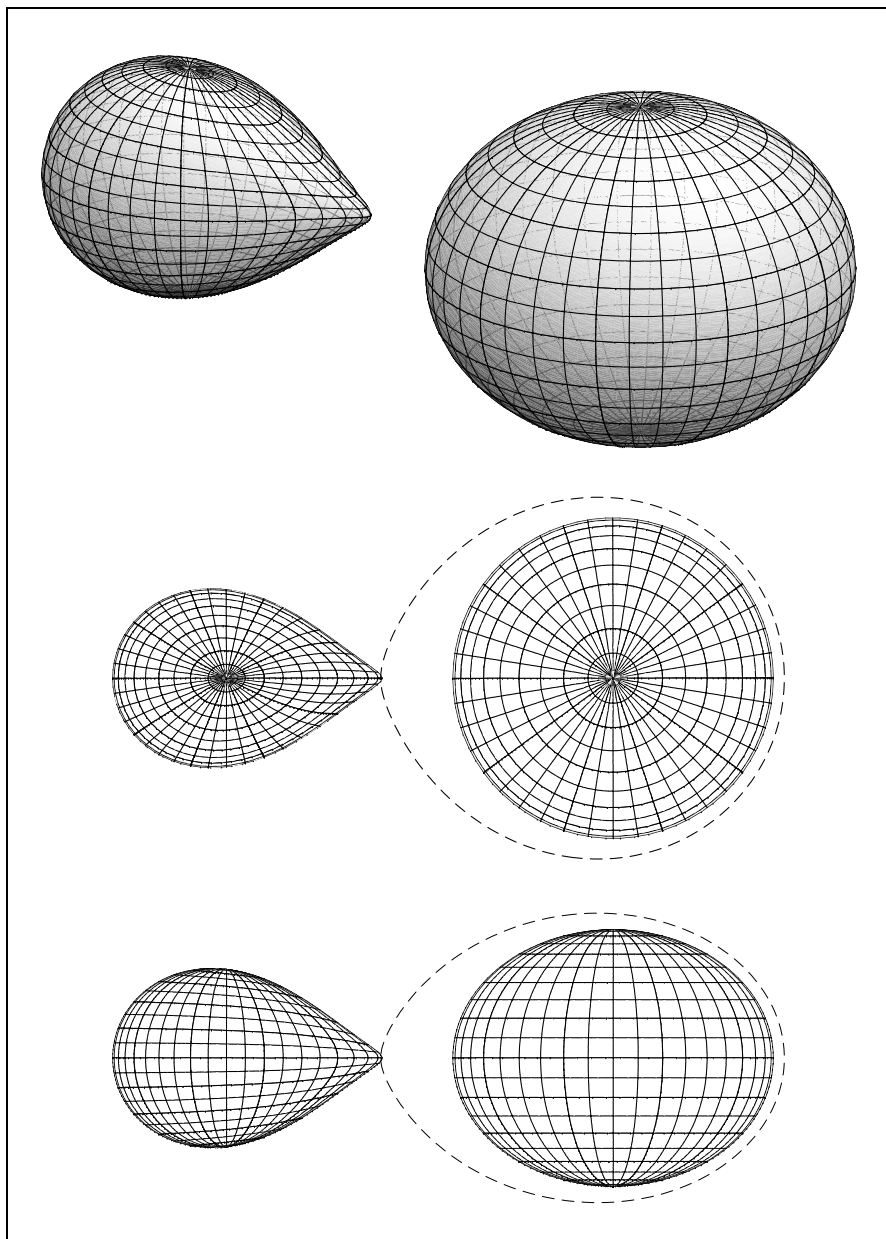


Рис. 7. Приливное искажение формы звёзд в двойной системе. Большая звезда не заполняет собой полость Роша (показана пунктиром), а меньшая — заполняет, и её вещество может перетекать на соседнюю звезду.

и центробежных сил. Максимальное расстояние между массивным телом и спутником, на котором это происходит, называют *пределом Роша*; очевидно, оно зависит не только от массы планеты, но и от средней плотности спутника. Так, если планета и спутник имеют одинаковую плотность, то предел Роша равен 2,45 радиуса планеты.

Как показали расчёты, жидкий спутник, обращающийся вокруг планеты на предельном расстоянии и вращающийся вокруг своей оси синхронно с орбитальным движением (как Луна вокруг Земли), имеет форму, близкую к трёхосному эллипсоиду с отношением осей $1 : 0,5 : 0,47$. При этом большая ось расположена вдоль направления к планете, а малая — вдоль оси вращения. Напомним, в используемом приближении понятие «жидкий» означает, что тело способно легко изменять свою форму так, чтобы его поверхность везде была перпендикулярна равнодействующей всех приложенных к ней сил. Предполагается при этом, что (помимо молекулярных сил, поддерживающих постоянный объём спутника из несжимаемой жидкости) здесь участвуют только силы тяготения. Однако решение задачи Роша может существенно измениться, если с гравитацией окажутся сравнимы силы светового давления или влияние магнитных полей.

Предположение о равенстве средних плотностей планеты и её спутников казалось оправданным в середине XIX в., когда о физическом строении спутников было известно очень мало. Сейчас известно, что далеко не всегда спутники планет имеют ту же плотность, что и сами планеты. Ещё менее схожи плотности у компонентов двойных звёзд. Поэтому удобно сформулировать положение о приливной устойчивости следующим образом: при синхронном обращении по круговой орбите жидкий спутник становится неустойчивым и начинает терять вещество со своей поверхности, если какая-либо часть спутника лежит вне критической полости Роша (рис. 7).

Если суточное вращение спутника или планеты происходит не синхронно с их орбитальным обращением, то, помимо искажения формы тел, возникают новые приливные эффекты. Важнейшими из них являются *приливное трение* и *прецессия* оси вращения.

Представим себе, что период суточного вращения планеты короче, чем орбитальный период её спутника. Тогда приливные горбы вследствие инерционности и вязкости будут опережать направление на спутник (рис. 8). А поскольку притяжение спутника

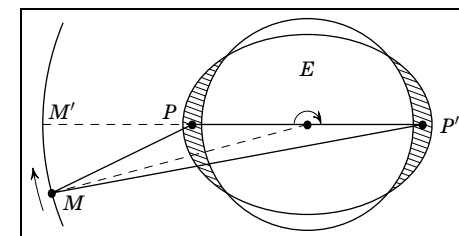


Рис. 8. Приливное трение. Если угловая скорость вращения планеты E превосходит угловую скорость вращения спутника M , то приливные горбы P и P' «снесаются» в направлении вращения планеты и уже не ориентированы строго на спутник.

к ближнему горбу сильнее, чем к дальнему, орбитальное движение спутника будет ускоряться, и он станет удаляться от планеты. В свою очередь, планета под действием приливных сил спутника будет замедлять своё вращение. Хотя полный момент вращения в системе «планета—спутник» при этом сохранится, приливное трение, стремясь синхронизировать движение планеты и спутника, приведёт к перераспределению вращательного момента между обоими телами.

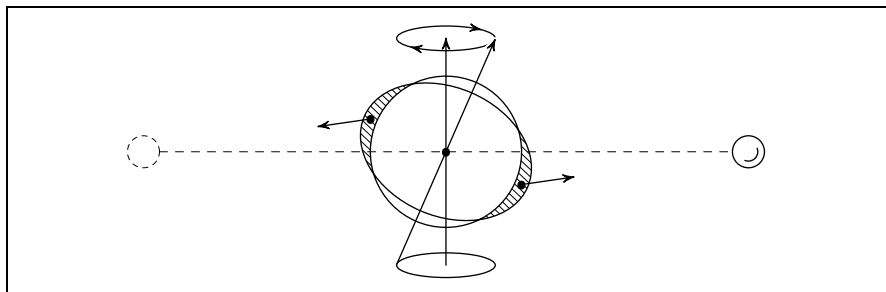


Рис. 9. Прецессия оси вращения планеты под приливным воздействием спутника на экваториальное «вздутие» планеты (показаны два диаметрально противоположных положения спутника на орбите).

Второй эффект — прецессия — возникает в том случае, когда ось вращения планеты не перпендикулярна плоскости орбиты спутника. Как мы знаем, в результате суточного вращения планеты она принимает форму эллипсоида, при этом её можно условно разделить на сферическое тело и экваториальный пояс. И если движение спутника происходит не в плоскости экватора планеты, то приливные силы, приложенные к экваториальному поясу, стремятся развернуть ось вращения планеты. В результате эта ось будет описывать некоторый конус вокруг орбитальной оси спутника. Это и есть явление прецессии (рис. 9).

Часто это явление уподобляют прецессии волчка, вращающегося на столе. Действительно, эти два феномена весьма схожи, однако есть и различия: при одинаковом направлении вращения волчка и планеты, движения их осей происходят в разных направлениях (см. рис. 14). Вы легко разберётесь, почему это так, если рассмотрите моменты сил действующих на планету и волчок.

ПРИЛИВЫ НА ЗЕМЛЕ

— Если бы кое-кто не совался в чужие дела, — хрипло проворчала Герцогиня, — Земля бы вертелась быстрее!
Льюис Кэрролл, «Алиса в стране чудес».

Основные приливные возмущения Земля испытывает со стороны Луны и Солнца, причём лунные возмущения примерно вдвое сильнее

солнечных. Величину статических лунных приливов на поверхности Земли легко оценить — она составляет около 75 см (а точные вычисления дают 54 см). Вращение Земли относительно Луны происходит с периодом 24 ч. 52 мин. За это время по земной поверхности проходят два приливных горба, и, следовательно, интервал между лунными приливами должен составлять 12 ч. 26 мин. В действительности же этот интервал у морских приливов часто не соблюдается, приливные горбы не всегда лежат на линии «Земля—Луна», а амплитуда приливов у берега порой достигает многих метров. Поэтому, хотя связь морских приливов с Луной подозревалась давно, доказать это и понять все её закономерности оказалось совсем не просто. Даже пытливый ум Леонардо да Винчи был в своё время введён в заблуждение. Сравнив высоту приливов в разных портах Европы и моменты их наступления, он заключил, что явление это не связано с Луной и Солнцем.

Для И. Ньютона разгадка причины приливов была одним из главных стимулов работы над проблемой тяготения. В своих «Началах» он с гордостью писал: «Я изъяснил небесные явления и приливы наших морей на основании силы тяготения». Однако «изъяснил» их И. Ньютон не полностью, а лишь в предположении, что вся Земля

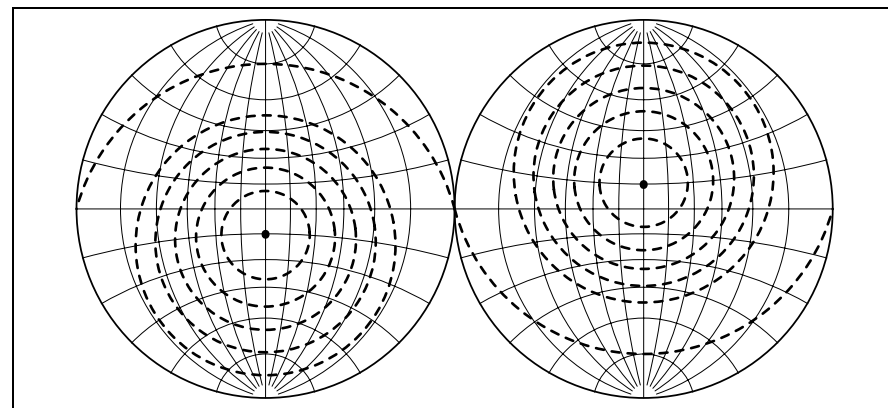


Рис. 10. Карта статического прилива: нанесены линии равной высоты воды для идеальной, невращающейся, всюду покрытой океаном планеты [3].

является сплошным океаном (рис. 10). В действительности океан покрывает поверхность нашей планеты тонким слоем, да и то не везде. Длина приливной волны (порядка 10^4 км) значительно превышает среднюю глубину океана (3,5 км), поэтому волна распространяется, как говорят физики, «на мелкой воде».

Последнее означает, что собственная частота колебаний воды и скорость приливной волны зависят от глубины океана в каждой конкретной точке. Представить себе, что такое собственная частота

колебаний, можно, обратившись к примеру с ниткой с грузом (маятнику), находящейся в руке. Если рука неподвижна, то приведённый в движение маятник будет колебаться с собственной частотой. Если же совершать колебания рукой, но с частотой, меньшей собственной частоты маятника, то он будет их повторять, находясь в фазе

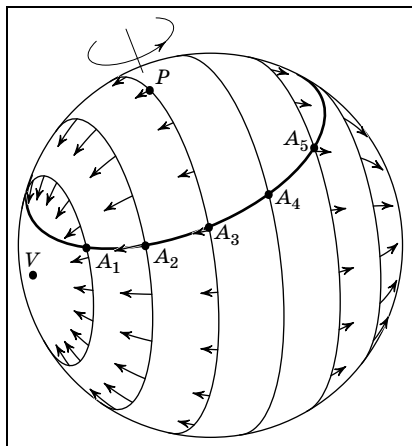


Рис. 11. Горизонтальная составляющая приливообразующей силы [3]. Для простоты показано лишь влияние Луны. Наклон лунной орбиты к экватору Земли приводит к асимметрии распределения сил относительно земной оси. P — Северный полюс Земли; V — точка Земли, где Луна наблюдается в зените (или в надире); $A_1 A_2 A_3 A_4 A_5$ — географическая параллель, по которой движется наблюдатель вследствие суточного вращения планеты.

поверхности планеты, но и стремится переместить её в горизонтальном направлении: значение горизонтальной составляющей минимально на полюсах эллипсоида и его «экваторе», максимально — в «средних широтах» (рис. 11). Отличие океана от твёрдой поверхности Земли как раз в том и состоит, что он поддаётся горизонтальному перемещению, тогда как суша только поднимается и опускается на 35—40 см и практически не смещается по горизонтали. В открытом океане скорость приливных течений составляет 3—5 узлов, что даже для современных мореплавателей является существенной величиной (1 узел = 1,852 км/ч). А в отдельных местах, например у северного побережья Шотландии, эта скорость достигает 10—12 узлов.

Не обладая по сравнению с земными недрами практически никакой вязкостью, вода океана долго сохраняет свой импульс относи-

тельно суши. Встреча приливной океанской волны с сушей подобна взрыву кумулятивного снаряда: двигаясь с небольшой скоростью на глубоком месте, вода ускоряется, оказавшись зажатой между поднимающимся дном и горизонтальной свободной поверхностью. Эффект усиливается, если приливная волна входит в пролив, фьорд или бухту, где оказывается зажатой ещё с двух сторон вертикальными стенками (как в проливе Ла-Манш или в заливе Фанди).

Вспомним, что лунные приливы складываются с солнечными, амплитуда которых в нынешнюю эпоху примерно вдвое меньше. Лунные и солнечные приливы либо усиливают, либо ослабляют друг друга в зависимости от взаимного положения трёх тел. Например, особенно высокие приливы происходят, когда Луна, Солнце и Земля находятся на одной прямой (это бывает в новолуние и в полнолуние). В этом случае приливные эффекты Солнца и Луны складываются и волна получается особенно высокой (так называемые *сизигийные* приливы). И наоборот, в моменты первой и последней лунных четвертей, когда угол между Солнцем и Луной составляет 90° , горб лунного прилива приходится на впадину солнечного прилива, и они взаимно ослабляют друг друга (так называемые *квадрантурные* приливы). Поэтому высота приливов связана с фазами Луны.

Как мы уже знаем, в результате приливного трения Земля замедляет своё суточное вращение, а Луна получает дополнительную потенциальную энергию и удаляется от Земли. Поэтому в далёком прошлом лунные приливы были значительно сильнее, а в будущем они ослабнут, и относительная роль солнечных приливов возрастёт.

Поскольку в прошлом приливы были сильнее, они играли более серьёзную роль в эволюции Земли в частности её биосферы. Обычно считается, что в приливной полосе были особенно благоприятные условия для выхода жизни из воды на сушу.

Но с приливами связаны не только жизненные циклы моряков и животных: несмотря на удаление Луны, вполне возможно, что в недалёком будущем роль приливов в нашей жизни возрастёт в связи с использованием приливных электростанций. Уже давно было известно, что приливные течения, проходящие через узкие проливы, можно использовать для получения энергии в такой же степени, как водопады и плотины на реках. Так, например, в Сен-Мало во Франции с 1966 г. успешно действует приливная гидроэлектростанция (рис. 12). Такие станции являются хотя и не самым дешёвым, но во всяком случае самым стабильным источником энергии, поскольку на колебания уровня океана не влияют ни погода, ни истощение ресурсов, ни другие кризисные ситуации.

Приливное трение обуславливает выделение в Земле тепла в количестве около $5 \cdot 10^{12}$ Вт, что составляет около 20% от собственного теплового потока нашей планеты. До сих пор так и не ясно, где выделяется эта тепловая энергия — на океанском мелководье или



Рис. 12. Первая в мире приливная гидроэлектростанция на побережье Ла-Манша в бухте между городами Динан и Сен-Мало. Высота приливов здесь достигает 13,5 м. Сила приливов преобразуется в электричество 23 генераторами. Длина плотины электростанции — 350 м. (Фото ИТАР-ТАСС.)

в твёрдой коре Земли. Амплитуда приливной волны в земной коре на широте Москвы составляет около 40 см; к высоким широтам она уменьшается. Замечено, что уровень подземных вод, нефти и даже вулканической лавы испытывает колебания синхронно с приливами. А частота внезапных выбросов угля и газа на угольных шахтах возрастает в период сизигийных приливов по сравнению с квадратурными в 10 раз и более. Вероятно, это связано с нарушением равновесия в пластах земли и с появлением микротрещин. Таким образом, для горняков земные приливы представляют такой же практический интерес, как океанские для моряков.

Банка Кашеварова

В центре Охотского моря, между Сахалином и Камчаткой, располагается вытянутое на 200 км поднятие дна — банка Кашеварова. Она привлекла к себе внимание исследователей, когда на спутниковых фотографиях, сделанных в зимний период, над банкой и рядом с ней обнаружили полыньи и разводья в ледовых полях [12]. Нужно заметить, что роль полыней для зимнего моря очень велика: через них происходит практически весь обмен теплом между водой и воздухом,

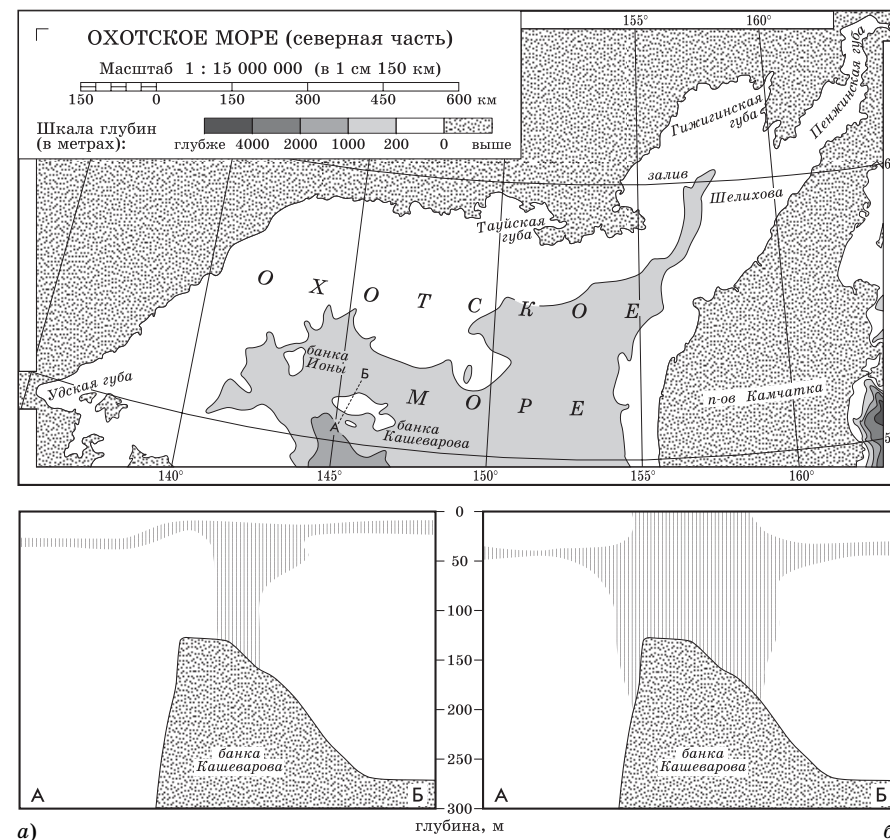


Рис. 13. На температурных разрезах (А—Б) через банку Кашеварова, выполненных в разные фазы двухнедельного цикла (а — 1—2 августа 1994 года, б — 23—24 августа 1994 года) видно как меняется ширина области перемешивания (заштрихована) при усилении приливных течений [12].

когда остальное море покрыто льдом. Весной участки открытой воды хорошо поглощают солнечные лучи, тогда как на соседних участках они почти полностью отражаются от покрытого снегом льда.

Как выяснилось, причиной незамерзающего «окна» над банкой Кашеварова является приливное движение воды, перемешивающее холодные верхние и более тёплые, но солёные нижние слои, поступающие из Тихого океана. Упираясь в банку (ведь это гора на морском дне), придонное течение взмывает вверх и растапливает лёд. Скорость приливного течения в районе банки Кашеварова изменяется от 0,1 до 1,7 м/с в зависимости от времени суток и склонения Луны (рис. 13). Правда, зависимость эта весьма своеобразная: суточный ритм прилива проявляется значительно сильнее полусуточного; но двухнедельный

ритм имеет период 13,66 сут., равный полупериоду орбитального движения Луны. Двухнедельный приливный ритм дирижирует жизнью в этих водах: он проявляется в развитии фитопланктона и кораллов.

Вообще, особенность Охотского моря — большие приливы и сильные приливные течения. Приливной энергии в нём поглощается больше, чем во всём Северном Ледовитом океане. Этой энергии иногда достаточно, чтобы смешать верхний и нижний слои воды и воспрепятствовать образованию льда. Например, в Пенжинском заливе, на самом севере моря, где приливы самые большие в России, ледяной покров не устанавливается даже зимой.

Прецессия и нутация

Плоскость земного экватора наклонена на $23,5^\circ$ к плоскости её орбиты, в которой расположено Солнце и близ которой располагается Луна. Совместное приливное влияние Луны и Солнца на экваториальное вздутие Земли создаёт момент сил, который постепенно изменяет направление оси вращения планеты: эта ось в первом приближении описывает конус вокруг оси земной орбиты (т. е. перпендикуляр к орбитальной плоскости Земли), возвращаясь к своему исходному положению через 25 770 лет. Это движение называют *прецессией* земной оси (рис. 14). Поскольку основная астрономическая система координат связана с плоскостью земного экватора, астрономы давно заметили это движение: прецессию открыл древнегреческий учёный Гиппарх (180—110 гг. до н. э.).

Для астрономов прецессия — малоприятное явление, вынуждающее их постоянно перевычислять координаты звёзд в экваториальной системе координат. В быту прецессия незаметна: как и наши деды, мы считаем Полярную звезду указателем севера. Но за несколько тысячелетий ось Земли поворачивается настолько сильно, что роль Полярной звезды переходит к иным светилам. Так, в 2600 г. до н. э. северный конец земной оси смотрел на звезду Тубан (α Дракона), а к 7500 г. роль Полярной звезды перейдёт к α Цефея.

Впрочем, прецессия касается не только астрономов и путешественников, но и всех прочих обитателей Земли. Дело в том, что смена времён года в основном связана с наклоном земной оси, но отчасти и с вытянутостью земной орбиты. Сейчас в декабре—январе, когда Северное полушарие «отворачивается» от солнечных лучей, земной шар располагается ближе всего к Солнцу; это смягчает зиму в Северном полушарии и делает более жарким и засушливым лето в Южном полушарии. Однако через 13 тыс. лет ситуация изменится: прецессия развернёт земную ось и лето в Северном полушарии станет более жарким, а зима более холодной.

Если бы плоскость лунной орбиты совпадала с плоскостью земной орбиты, то движение земной оси ограничивалось бы прецессией.

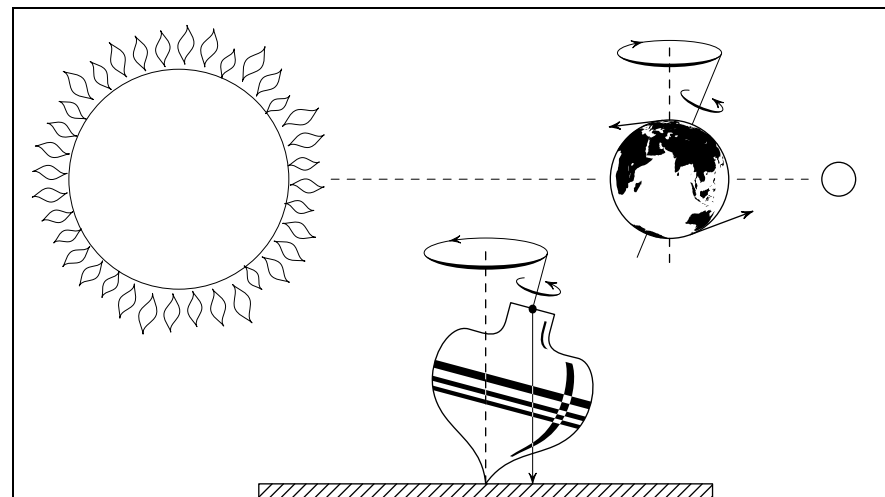


Рис. 14. Под действием Луны и Солнца ось вращения Земли совершает прецессию, двигаясь подобно волчку: её ось также совершает коническое движение, но в противоположном, чем у волчка, направлении. А почему?

Однако лунная орбита наклонена к земной на угол около 5° . К тому же ось лунной орбиты совершает коническое движение вокруг оси земной орбиты с периодом 18,6 года. Это явление можно рассматривать как «прецессию» орбиты Луны под приливным влиянием Солнца (попробуйте мысленно «размазать» Луну вдоль её орбиты и рассмотреть движение этого торообразного волчка). Поэтому совместное приливное влияние Луны и Солнца на Землю также изменяется с периодом 18,6 года, что приводит к небольшим возмущениям простого прецессионного движения земной оси: на фоне её медленного конического движения с амплитудой $23,5^\circ$ наблюдаются быстрые «покачивания» с периодом 18,6 года и амплитудой около $10''$. Они были обнаружены в 1737 г. английским астрономом Дж. Брадлеем и названы *нутацией*. Стоит ли говорить, что у астрономов после этого появились новые заботы.

Приливы над Землёй

Уже не одно столетие геофизики изучают приливы в атмосфере Земли. В принципе, теория атмосферных приливов проще, чем морских. Исторически сначала была создана теория приливов для жидкого шарообразного тела, а затем для океана постоянной глубины, покрывающего шар или эллипсоид вращения. Однако нерегулярность береговой линии и сложный профиль океанского дна потребовали создания более точной теории морских приливов, которая продолжает

развиваться и в настоящее время. В случае же земной атмосферы эти затруднения, казалось бы, отсутствуют, ведь атмосфера — это, можно сказать, океан постоянной глубины, да к тому же без берегов. И долгие годы основные трудности в исследовании атмосферных приливов были не теоретического, а наблюдательного порядка. Мы находимся на дне воздушного океана и поэтому вынуждены измерять колебания атмосферного давления, а не изменения уровня поверхности. Впрочем, поверхности у атмосферы, в отличие от океанов, вообще нет.

В 1774 г. П. Лаплас в своём знаменитом мемуаре о приливах показал, что при различных предположениях о толщине атмосферы приливы в ней могут быть как прямыми, так и обратными, т. е. происходить как в фазе, так и в противофазе с движением спутника планеты. Согласно его расчётам, приливы должны быть прямыми, а изменение давления земной атмосферы должно составлять 0,22 мм рт. ст. Атмосферные приливы были обнаружены уже в начале XIX в., и оказалось, что их характер гораздо сложнее.

Лишь на первый взгляд атмосфера кажется проще океана. В действительности же она является сложным многослойным резонатором, свойства которого зависят от распределения плотности воздуха, а она, в свою очередь, связана с распределением температуры, которая изменяется как с высотой, так и со временем. Решающее влияние на распределение температуры оказывает распространение солнечного излучения в атмосфере, его интенсивность, которая изменяется со временем (например, в течение суток), что существенно усложняет теорию приливов.

Так, например, на классические лунно-солнечные гравитационные приливы накладываются термические приливы значительно большей амплитуды, вызванные прямым нагревом и расширением атмосферы на дневной стороне планеты. Казалось бы, эти два типа приливов легко можно разделить по их периоду: гравитационные имеют полусуточный период, а термические должны иметь суточный период. Однако выяснилось, что и термические приливы имеют сильную полусуточную составляющую, поскольку в атмосфере способны усиливаться колебания с периодом, близким к 12 ч. И для изучения таких колебаний атмосферы большое значение имеет активный эксперимент.

Первые надёжные измерения колебания атмосферы были проведены после взрыва вулкана Кракатау в 1883 г. и Тунгусской катастрофы в 1908 г. Вызванные этими явлениями акустические волны в атмосфере несколько раз обогнули земной шар и были зарегистрированы приборами многих обсерваторий. В 1940-х и 1950-х годах аналогичные волны наблюдались после ядерных взрывов в атмосфере. К середине XX в., когда в общих чертах была изучена структура атмосферы, теоретические исследования атмосферных приливов были в основном завершены.

Космическая гантель

Приливный эффект создаёт не только научные, но и технические проблемы; особенно близко знакомы с ними космические инженеры. Например, некоторые искусственные спутники Земли (ИСЗ) имеют штыревые радиоантенны длиной в сотни метров. В приливном поле планеты их присутствие создаёт значительный момент силы. Поэтому такие «выдающиеся» детали стремятся размещать на корпусе спутника по возможности симметрично, имея в виду не зеркальную, а осевую или даже (в идеале) — центральную симметрию. Яркий пример такой конструкции — американский ИСЗ «Имэйдж», на корпусе которого крестообразно располагаются четыре тонкие радиальные антенны длиной по 250 м, а перпендикулярно к плоскости этого креста — две симметричные массивные фермы длиной по 10 м. В целом такая конструкция хорошо уравновешена в отношении приливных моментов.

Впрочем, иногда приливные силы «приставляют к делу». Геодезические спутники США «Транзит», запускавшиеся в 1960-е годы, не имели активной системы ориентации, но должны были держать свои антенны постоянно нацеленными на Землю. С этой целью небольшой спутник снабжался «противовесом», вынесенным на штанге длиной 33 м: приливное влияние Земли удерживало штангу в среднем в направлении центра планеты, хотя относительно этого направления спутник испытывал небольшие колебания, подобные либрациям Луны.

А вот для астрономических приборов ориентация на Землю не нужна, и воздействие приливных моментов на них нежелательно. Но, к сожалению, астрономические спутники обычно имеют как раз вытянутую форму, и поэтому конструкторам приходится решать проблему приливных моментов. Например, если система ориентации астрономического спутника основана на силовых гироскопах, то в результате борьбы с приливным моментом гироскопы в конце концов раскручиваются до предельных скоростей. И чтобы снять с них нагрузку, приходится дополнительно снабжать аппарат реактивной системой ориентации.

Но постепенно инженеры научились запрягать нежелательные силы в помощь своим системам: приливное воздействие уже используют для ориентации астрономических спутников. Знаменитая космическая обсерватория «Эйнштейн», предназначенная для рентгеновских наблюдений, имела вытянутую форму. Поэтому наблюдения на ней планировались так, чтобы приливный момент помогал разворотам спутника при перенаведении с одного объекта на другой.

Недавно французские астрономы предложили проект орбитального оптического интерферометра для измерения диаметров звёзд и поиска планет вдали от Солнечной системы: прибор выполнен в виде трубы диаметром 3 м и длиной 200 м; вдоль стенки трубы проделано

несколько круглых окон, поэтому проект получил название «Флейта». Ясно, что поддержание точной ориентации такого инструмента будет представлять непростую задачу. Возможно, приборы такого типа придётся делать приливно-компенсированными, т. е. распределять в них массу центрально-симметрично.

А вот ещё одна история. В 1996 г. Исследовательская лаборатория Военно-морских сил США запустила на околоземную орбиту высотой около 1000 км два небольших спутника, связанных тросом длиной 4 км и диаметром 2—3 мм. Спутники размером по 60 см имели массы 40 и 10 кг. Им дали имена «Ральф» и «Нортон» в честь героев популярной американской развлекательной телепрограммы 1960-х годов. Зачем же этих двоих, как альпинистов, отправили на орбиту в связке?

Оказывается, это был уже второй эксперимент с привязным спутником: за полгода до него подобный эксперимент проводился во время полёта многоразового космического корабля «Спейс шаттл». Тогда небольшой спутник был спущен на тросе из грузового отсека шаттла в сторону земной поверхности, но трос перекрутился и оборвался. Целью того эксперимента была проверка идеи о возможности получать электричество от проводника, движущегося в ионосфере Земли. Хотя эксперимент не удалось довести до конца, электрический ток в проводнике удалось зафиксировать, причём даже больший, чем предсказывали теоретические оценки до полёта.

Эксперимент со спутниками «Ральф» и «Нортон» предприняли для изучения динамики и жизнеспособности связанных систем. Всё это звенья большой программы по разработке орбитальных систем, способных вырабатывать электричество без солнечных батарей и маневрировать без ракетных двигателей. Солнечные батареи, как известно, быстро стареют под действием солнечной радиации, да и весят немало. К тому же они усложняют конструкцию космических станций и мешают манёврам транспортных аппаратов вблизи них. Поэтому поиски альтернативных источников электричества — насущная задача для космонавтики.

А изменение орбиты без затрат топлива — это ли не мечта космического инженера. На первый взгляд это кажется невозможным, всё равно что вытаскивать себя за волосы из болота. Однако это не так: два связанных космических аппарата, используя лишь электродвигатель для изменения длины соединяющего их троса, могут двигаться в гравитационном поле планеты по раскручивающейся или сжимающейся спиралеобразной орбите. Используя солнечную энергию как источник электричества и не потратив ни капли топлива, такая связка из двух аппаратов может поднять свою орбиту от низкой околоземной до геостационарной и даже до лунной!

Однако научиться управлять орбитальными манёврами связанной системы — непростое дело. Двигаясь по относительно низкой орбите, связка спутников испытывает весьма мощное приливное вли-

яние Земли, вызывающее колебания системы с периодом 50 минут (половина орбитального периода). Предварительные расчёты указывали, что связывающий спутники трос должен изгибаться при этом на 30°. Для проверки теоретического прогноза систему спутников «Ральф—Нортон» наблюдали с Земли с помощью телескопа. Полученные изображения подтвердили расчёт: длинный трос действительно периодически изгибался согласно предсказанию. Если захотите подробно узнать, как космическая «гантель», используя приливный эффект, может маневрировать на орбите, загляните в замечательную книгу Белецкого [1].

СИСТЕМА «ЗЕМЛЯ—ЛУНА»: ЛАБОРАТОРИЯ ПРИЛИВОВ

Вернёмся вновь к приливам на Земле. Мысль о том, что морские приливы, обегая Землю в направлении, противоположном её вращению, и встречая препятствия в виде материков и мелководья, могут тормозить вращение Земли, высказал ещё в 1754 г. И. Кант. Проверить это можно было бы, измеряя, как меняется со временем продолжительность суток. Но для этого необходимы очень точные часы, которых в XVIII в. не было. Правда, ещё в 1695 г. Э. Галлей, проанализировав древние и современные ему солнечные затмения, заподозрил, что угловая скорость движения Луны увеличивается по отношению к скорости вращения Земли. Дальнейшие наблюдения подтвердили это, но, как мы теперь понимаем, в действительности не Луна ускоряет свой бег, а Земля замедляет своё вращение.

Приливные горбы на поверхности Земли увлекают Луну вперёд по орбите. Однако при этом радиус её орбиты увеличивается и в результате угловая скорость Луны уменьшается. Те же приливные горбы тормозят вращение Земли, причём угловая скорость Земли уменьшается быстрее, чем угловая скорость Луны. Поэтому при измерении скорости обращения Луны относительно вращения Земли (которое до недавних пор играло роль часов) нам кажется, что Луна ускоряет своё движение. Вот почему астрономы всё же говорят о *вековом ускорении* Луны под действием приливного трения.

Достаточно точные механические, а затем и электронные часы были созданы лишь в первой половине XX в., и с их помощью действительно было обнаружено систематическое удлинение земных суток на величину крайне малую — всего лишь на 0,0015 с за 100 лет. Но за последние 2000 лет Земля «отстала» от идеальных часов на 3 ч. — это вполне можно заметить по отличию мест на Земле, где происходили исторические солнечные затмения, от результатов расчётов по эфемеридному времени, которые и проделал Э. Галлей.

Итак, под действием приливного трения изменяется как период вращения Земли, так и период обращения Луны. Можно ли рассчитать эти изменения в прошлом и будущем?

Известно, что сейчас приливные горбы смещены относительно направления на центр Луны примерно на 2° . Эта величина называется *углом запаздывания* приливов и является важнейшей характеристикой приливного трения. Она определяет скорость торможения Земли и характер эволюции орбиты Луны. Если предположить, что угол запаздывания всегда был и останется таким же, как сейчас, то расчёт динамики системы «Земля—Луна» приводит к следующим результатам.

В будущем Луна будет продолжать удаляться от Земли. Через 5 млрд. лет радиус её орбиты достигнет максимального значения — 463 тыс. км, а продолжительность земных суток станет составлять 870 ч. В этот момент скорости вращения Земли и Луны станут равными: Земля будет смотреть на Луну одной стороной, так же как Луна сейчас смотрит на Землю. Казалось бы, приливное трение при этом должно исчезнуть. Однако солнечные приливы будут продолжать тормозить Землю. Но теперь уже Луна будет опережать вращение Земли и приливное трение начнёт тормозить её движение. В результате Луна станет приближаться к Земле, правда, очень медленно, так как сила солнечных приливов невелика.

В прошлом Луна была ближе к Земле, чем сейчас. Расчёты показывают, что примерно 2 млрд. лет назад Луна находилась от нас на расстоянии всего лишь 3 земных радиуса. Нетрудно подсчитать, что приливы на Земле в ту пору достигали высоты несколько километров. А поскольку период суточного вращения Земли был тогда около 3 ч., можно представить себе, какую разрушительную силу несли эти приливы. Что было ещё раньше, сказать трудно. Формальные расчёты говорят о том, что 3—4 млрд. лет назад Луна вращалась в направлении, обратном суточному вращению Земли. Приливное трение тормозило её, и Луна приближалась к Земле. Одновременно увеличивался наклон лунной орбиты к земному экватору. В период наибольшего сближения, 2 млрд. лет назад, орбита Луны стала полярной, после чего вращение сменилось на прямое.

Сейчас Луна удаляется от Земли. В дальнейшем, как мы уже знаем, это удаление прекратится и она вновь начнёт приближаться к Земле. Разумеется, временная шкала описанных процессов может измениться, если окажется, что угол запаздывания приливов не является постоянной величиной, но принципиальных изменений ожидать трудно, во всяком случае в прогнозе на будущее.

Для проверки астрономических расчётов желательно найти независимые методы. Например, можно ли узнать продолжительность суток в далёком прошлом? Оказалось, это не так уж сложно. Палеонтологи обнаружили ископаемые колонии цианобактерий — строматолиты (внешне они напоминают коралловые постройки), которые образовались сотни миллионов лет назад. Как и у современных кораллов, их рост происходил с разной скоростью: в течение дня они

росли в одном темпе, в течение ночи — в другом, и в одном темпе летом, в другом — зимой. В результате на отполированной поверхности их среза остаются отметки, очень похожие на кольца деревьев, которые отмечают дни и ночи.

В 1963 г. американский палеонтолог Джон Вест Уэллс тщательно изучил эти ископаемые строматолиты и подсчитал, сколько тонких — суточных — отметок приходится на каждую грубую — годовую — отметку. Оказалось, что в начале юрского периода (180 млн. лет назад) год состоял примерно из 385 сут., в силурийский период (400 млн. лет назад) в году содержалось почти 400 сут., а в кембрии (500—600 млн. лет назад) год продолжался 420—425 сут. Поскольку длительность самого года не могла заметно измениться за это время, остаётся признать, что в кембрийский период сутки продолжались всего 20,6 ч. К сожалению, этот метод не позволяет проникнуть в ещё более далёкое прошлое Земли: хотя найдены строматолиты возрастом до 3,5 млрд. лет, образовавшие их бактерии в эпоху докембрия были существенно иными (прокариоты, в отличие от более поздних эукариотов) и не оставляли суточных отметок. Но и того, что поведали нам строматолиты о замедлении вращения Земли, достаточно, чтобы убедиться в принципиальной верности астрономических расчётов и уточнить некоторые их детали.

ЗАГАДКИ МЕРКУРИЯ И ВЕНЕРЫ

Меркурий — ближайшая к Солнцу планета, а потому влияние солнечных приливов должно проявляться в его движении наиболее заметно. Расчёты показывают, что солнечные приливы способны в несколько раз замедлить вращение Меркурия за время около 1 млрд. лет. Действительно, суточное вращение Меркурия происходит очень медленно: планета совершает оборот вокруг своей оси (звёздные сутки) за 58,646 сут., тогда как вокруг Солнца она обходит за 87,969 сут. Это означает, что за время трёх оборотов вокруг своей оси Меркурий дважды обходит вокруг Солнца — такое движение называют резонансным в отношении 3 : 2 (рис. 15).

На первый взгляд не ясно, почему приливные силы не синхронизовали суточное и орбитальное вращение планеты в отношении 1 : 1, как в случае Луны. Основываясь на оптических наблюдениях, проделанных Дж. Скиапарелли и другими, астрономы почти целое столетие заблуждались, полагая, что Меркурий вращается, обратив

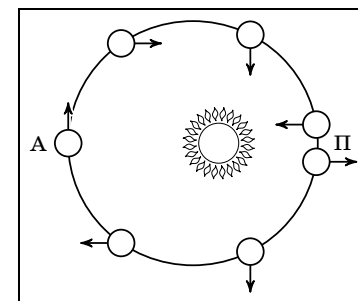


Рис. 15. Резонанс между суточным и орбитальным вращением Меркурия. Показаны различные положения планеты на орбите; стрелка указывает ориентацию одного из полушарий Меркурия.

к Солнцу одно из своих полушарий (как Луна к Земле). Однако проведённая в 1965 г. радиолокация Меркурия показала, что период его вращения в 1,5 раза короче меркурианского года. Любопытно, что астрономы-оптики, пересмотрев вслед за этим свои прежние наблюдения, также сделали вывод о 59-суточном периоде вращения Меркурия.

Итак, вопрос не в том, почему Меркурий вращается медленно, а в том, почему его орбитальное и суточное вращения находятся в резонансе 3 : 2, а не 1 : 1?

Оказывается, всё дело в том, что орбита Меркурия имеет сравнительно большой эксцентриситет $e = 0,206$. В перигелии (П) Меркурий приближается к Солнцу на 0,307 а. е., а в афелии (А) удаляется на 0,467 а. е. Это на первый взгляд небольшое различие в расстоянии приводит к существенным вариациям напряжённости приливного поля: в районе перигелия солнечные приливы на поверхности планеты в 3,5 раза сильнее, чем в афелии. Поэтому можно считать, что приливное поле как бы включается только в тот период, когда планета проходит через область перигелия орбиты, а в остальное время приливы практически отсутствуют. Следовательно, именно в перигелии приливы синхронизуют орбитальное и суточное вращение планеты и стремятся выровнять их угловые скорости.

Согласно второму закону Кеплера, скорость орбитального вращения планеты максимальна в перигелии и минимальна в афелии. Воспользовавшись формулами эллиптического движения, легко рассчитать, что в той окрестности перигелия орбиты Меркурия, где приливные силы ещё имеют заметную напряжённость, угловая орбитальная скорость примерно в 1,5 раза превосходит своё среднее значение. Вот в чём причина странного резонанса 3 : 2 — именно в окрестности перигелия суточное вращение Меркурия подстраивается под орбитальное, которое происходит здесь быстрее, чем в других частях орбиты.

Возможно также, что в поддержании точного резонанса в движении играет роль и распределение массы внутри Меркурия. Если планета имеет немного вытянутую форму, то в приливном поле Солнца она будет стремиться сориентировать свою большую ось вдоль направления на Солнце. Очевидно, что постоянно поддерживать такую ориентацию планета не может: суточное вращение происходит с постоянной скоростью, а орбитальная скорость периодически меняется. Значит, синхронизация будет происходить в области наибольшей напряжённости приливного поля — в окрестностях перигелия. При этом за время одного орбитального периода планета должна совершить целое число суточных полуоборотов (именно полуоборотов, поскольку в приливном поле, как видно на рис. 15, обе ориентации вытянутой планеты, различающиеся на 180° , будут одинаково устойчивыми). Из всех возможных вариантов — $1/2$, 1, $3/2$ оборота и т. д. — лишь при $3/2$ оборота за орбитальный период у планеты в перигелии будет не только синхронизовано положение большой оси с направле-

нием на Солнце, но наименьшим станет различие между угловыми скоростями орбитального и суточного вращений. Это приведёт к минимальному приливному трению и, следовательно, к устойчивости данного состояния.

Движение Меркурия любопытным образом связано с движением Земли. С точки зрения земного наблюдателя, Меркурий совершает один оборот вокруг Солнца за 115,85 сут. — это так называемый синодический период. За это время Меркурий успевает сделать почти точно 2 оборота вокруг своей оси. Правда, отсюда вовсе не следует, что в каждом нижнем соединении с Землёй (т. е. когда при наибольшем сближении обе планеты и Солнце расположены на одной прямой) Меркурий обращён к нашей планете одной своей стороной (к сожалению, это странное заблуждение встречается не только в научно-популярной литературе, но и в некоторых учебниках). Действительно, в нижнем соединении направление от Меркурия к Земле фиксирует линия «Солнце—Земля», которая поворачивается с угловой скоростью движения Земли по орбите ($1/365,26$ сут.). Таким образом, один оборот относительно этого направления поверхность Меркурия совершает за

$$\frac{1}{\frac{1}{58,646} - \frac{1}{365,26}} = 69,863 \text{ сут.}$$

Этот период не кратен синодическому году Меркурия ($\frac{115,85}{69,863} = 1,6582$), хотя, с точностью до сотых долей выполняется резонанс 3 : 5.

Возможно, это и послужило причиной ошибки Дж. Скиапарелли. Ведь наблюдать Меркурий можно лишь в течение одного сравнительно короткого периода в году — в летние месяцы, когда после захода Солнца планета видна сравнительно высоко над горизонтом. В течение земного года Меркурий успевает сделать почти точно 3 оборота вокруг Солнца и 5 раз повернуться вокруг оси (всё это относительно движущейся по орбите Земли). Скиапарелли провёл первые наблюдения Меркурия в 1881 г. и повторил их ровно через год. Разумеется, никаких изменений во внешнем виде планеты он не заметил и решил, что она всегда ориентирована одной стороной к Солнцу.

Теперь обратимся к Венере. Её орбитальный период составляет 224,7 сут., ему соответствует синодический год 583,9 сут. Суточное же вращение Венеры происходит в обратном направлении с периодом 243,0 сут. Учитывая тот факт, что направление суточного вращения обратное, нетрудно вычислить период вращения поверхности Венеры относительно линии «Солнце—Земля»:

$$\frac{1}{\frac{1}{243} + \frac{1}{365,26}} = 145,9 \text{ сут.}$$

Таким образом, за время между двумя последовательными нижними соединениями Венеры с Землёй поверхность Венеры успевает сделать

почти $584/146 = 4$ оборота относительно направления на Землю. Таким образом, в отличие от Меркурия, Венера каждый раз в нижнем соединении обращена к нашей планете одной и той же стороной своей поверхности.

Приливное влияние Земли на Венеру даже при их наибольшем сближении в 20 тыс. раз слабее солнечного. Почему же Венера не синхронизовала своё вращение с движением вокруг Солнца, а предпочла синхронизацию только с Землёй? Кроме того, почему Венера вращается в обратном направлении?

Расчёты показали, что солнечные приливы могли заметно затормозить вращение Венеры. Возможно также, что медленное обратное вращение планеты вызвано взаимодействием солнечного притяжения с горбом термического прилива в мощной атмосфере Венеры. А вот анализ взаимодействия Венеры с Землёй пока нельзя считать законченным. В принципе, если бы фигура Венеры была достаточно асимметричной, то приливное влияние Земли могло бы синхронизовать её современное вращение.

У слабого приливного поля Земли по сравнению с солнечным то преимущество, что в период нижнего соединения планет угловая скорость перемещения Венеры относительно Земли совпадает с относительной скоростью её суточного вращения. Иначе говоря, Венера на подходе к соединению и некоторое время после него «смотрит» на Землю одним боком. В то же время относительно Солнца Венера вращается довольно быстро (солнечные сутки на ней длятся 117 сут.), поэтому влияние солнечных приливов на постоянные (не приливные) горбы Венеры усредняется и на больших интервалах времени может быть слабее земных приливов.

Окончательно этот вопрос пока не решён — необходимы экспериментальные исследования внутреннего строения Венеры и детальные численные расчёты.

ЮПИТЕР И ВСЕ-ВСЕ-ВСЕ

Где в Солнечной системе приливные эффекты достигают наибольшей выразительности? Быть может — вблизи Солнца, благодаря его гигантской массе? Бесспорно, Солнце — мощный генератор приливов, сумевший, как мы знаем, синхронизовать вращение Меркурия. А как ещё проявило себя Солнце? Астрономы могут ещё вспомнить несколько случаев распада ядер комет вблизи Солнца, но полной уверенности в приливном характере этого явления нет, поскольку ледяное ядро кометы способно разрушиться и от сильного нагрева солнечным излучением. Таким образом, высокая светимость Солнца затрудняет исследование его приливного влияния «в чистом виде».

Иное дело — Юпитер, гигантская планета, уступающая Солнцу по массе, но зато холодная; так сказать, масса в чистом виде. Имен-

но вблизи Юпитера в конце XX века астрономы открыли два самых эффектных приливных явления. Первое связано с ближайшим к планете крупным спутником Ио. Своими размером и массой похожий на Луну, Ио резко выделяется среди других спутников планет Солнечной системы своей высокой вулканической активностью. Каков же источник энергии грандиозных вулканов Ио? Почему он единственный из всех спутников планет имеет раскалённые недра? Источником тепла Ио считаются его приливные деформации в гравитационном поле Юпитера. Под влиянием притяжения соседних спутников Ио движется по несколько вытянутой орбите, поэтому приливное воздействие вблизи поверхности спутника периодически изменяется. Это приводит к вязким деформациям спутника и выделению энергии. Высота статического прилива на Ио достигает 7 км (см. табл. 2), и поэтому не удивительно, что даже малое перемещение приливных горбов может так сильно разогреть недра спутника (см. 4-ю стр. обложки).

Однако наиболее ярко приливные силы Юпитера проявили себя в эпизоде с кометой Шумейкеров—Леви-9. Это было драматическое событие, настоящая космическая катастрофа!

Комета была открыта недалеко от Юпитера американскими астрономами Кэролайн и Юджином Шумейкерами вместе с Дэвидом Леви 24 марта 1993 г. на обсерватории Маунт Паломар в Калифорнии. Её назвали кометой Шумейкеров—Леви-9, поскольку она уже девятая, открытая этой троицей. Вычисления показали, что 9 июля 1992 г. комета прошла вблизи Юпитера, на расстоянии всего лишь 0,5 радиуса планеты от её поверхности, и была разорвана его притяжением более чем на 20 частей. До разрушения радиус её ядра был около 20 км. Растянувшись «паровозиком», осколки кометы удалились от Юпитера по вытянутой орбите, а затем, в июле 1994 г., вновь приблизились к нему и со скоростью более 60 км/с столкнулись с облачной поверхностью Юпитера (рис. 16). Астрономы впервые наблюдали столкновение кометы с планетой. Это было грандиозное событие, надолго оставившее «шрамы» на облачной поверхности планеты. Мощные взрывы раздвинули облака, и в образовавшиеся «окна» астрономы впервые смогли заглянуть вглубь атмосферы Юпитера.

Без сомнения, вблизи планет-гигантов подобные катастрофы происходят регулярно. Некоторые из них трудно предвидеть заранее, как это было в случае с кометой Шумейкеров—Леви-9, но другие вполне прогнозируемы. Так, у Нептуна всего один крупный спутник — Тритон, похожий на нашу Луну. Примечателен он тем, что движется в направлении, обратном суточному вращению Нептуна. При этом Тритон, естественно, тормозится приливным воздействием планеты и приближается к ней. Не исключено, что, двигаясь от периферии системы к её центру, массивный Тритон выбросил все остальные внешние спутники Нептуна в межпланетное пространство. Уцелела лишь далёкая Нереида — спутник среднего размера. Вероятно, она с самого

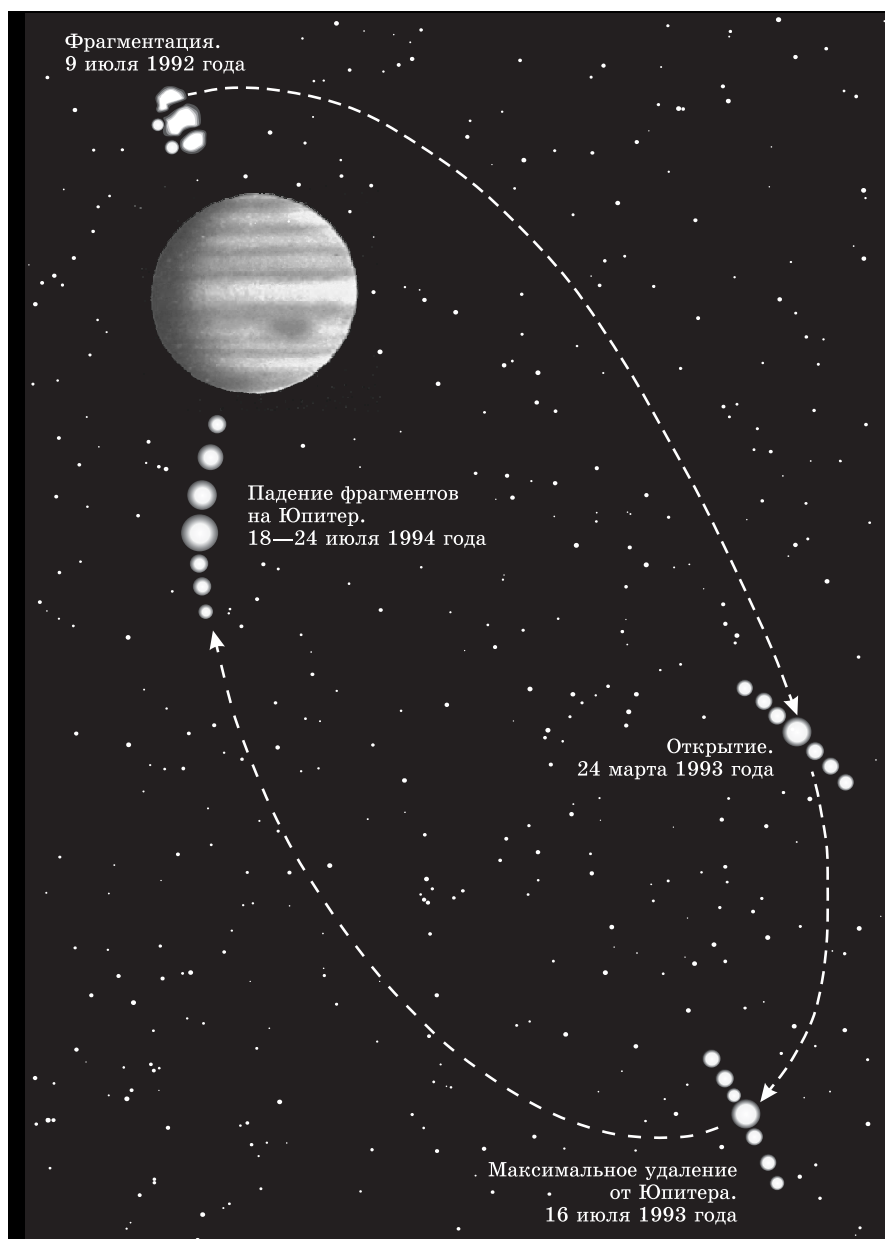


Рис. 16. Фрагменты кометы Шумейкеров—Леви-9, разорванной в 1992 г. притяжением Юпитера и открытой в 1993 г. в виде цепочки обломков, как и было предсказано, врезались 18—24 июля 1994 г. в атмосферу Юпитера.

начала была дальше от центра системы, чем Тритон. Приливным влиянием массивного Тритона на планету некоторые исследователи объясняют неожиданно высокую температуру атмосферы Нептуна (планета излучает в 2—2,5 раза больше тепла, чем получает от Солнца). Однако выдвигаются и другие объяснения на сей счёт.

Судьбу самого Тритона можно прогнозировать с полной определённости: он неминуемо приблизится к планете, сметёт несколько её маленьких внутренних спутников, разрушит тонкие кольца, но при этом и сам разрушится приливными силами планеты, украсив её великолепным новым кольцом, вероятно, более массивным, чем кольцо Сатурна. Не исключено, что центральная, наиболее плотная часть спутника достигнет атмосферы планеты. На это стоило бы посмотреть!

Однако не только планеты-гиганты управляют движением своих спутников при помощи приливов. Один из двух спутников Марса Фобос имеет орбитальный период короче марсианских суток и поэтому приближается к планете. Расчёты показывают, что всего лишь через 30—100 млн. лет Фобос должен упасть на Марс. Разумеется, если прежде спутник не разрушится. Впрочем, его разрушение уже началось: сейчас Фобос удалён от центра планеты на расстояние 2,76 марсианских радиусов. А с учётом того, что плотность спутника в 1,8 раза меньше средней плотности планеты, предел Роша для него соответствует расстоянию около 3 радиусов Марса. Детальные расчёты показывают, что значительная часть поверхности Фобоса уже находится за границей критической полости Роша. Правда, само понятие «полость Роша» имеет определённый смысл лишь для жидких однородных тел. Для сравнительно твёрдого Фобоса частичный выход поверхности за предел Роша ещё не означает, что слабосвязанное вещество (пыль, реголит) должно самостоятельно покидать поверхность спутника. В действительности поверхность Фобоса выступает за границу критической полости Роша как раз в тех местах, где приливные силы прижимают вещество к поверхности (см. рис. 5 и 6), поэтому вся поверхность спутника пока ещё покрыта толстым слоем реголита. Но уже скоро Фобос начнёт терять слабосвязанное вещество с поверхности, а затем и твёрдое тело спутника будет неминуемо разорвано, учитывая, что плотность Фобоса вдвое ниже плотности Марса. Неужели когда-то и Марс украсится «сатурновым» кольцом?

Следует упомянуть и о приливном влиянии самих спутников планет на ещё более мелкие тела, например, на ядра комет. Следы небольших приливных катастроф астрономы обнаружили на поверхности Луны и других спутников в виде характерных цепочек метеоритных кратеров. Исследование этих цепочек и расчёты показали, что именно так должны выглядеть следы удара обломков кометного ядра (или рыхлого астероида), разрушенного приливным эффектом

вблизи самой поверхности спутника. По этой причине вместо взрыва одной мощной «бомбы» поверхность получает нечто вроде короткой «пулемётной очереди». Как и в случае бомбардировки Юпитера обломками кометы Шумейкеров—Леви-9, цепочки кратеров на Луне и других спутников оказывают неожиданную услугу астрономам: вокруг таких цепочек лежит распылённое ещё на подлёте к поверхности вещество кометного ядра, которое можно изучать.

ПЛАНЕТЫ ВЛИЯЮТ НА СОЛНЦЕ!

О приливном влиянии Солнца на суточное вращение планет мы уже говорили. Оно велико для Меркурия, заметно для Венеры, в будущем будет играть роль в эволюции Земли и совершенно ничтожно для других планет. Период собственного вращения Солнца 28 сут.; планета с таким орбитальным периодом располагалась бы на расстоянии 0,18 а. е. от Солнца (можно назвать это расстояние радиусом синхронной окосолнечной орбиты). Радиус орбиты Меркурия более чем вдвое превышает эту величину; и он и другие планеты под действием приливного трения должны медленно удаляться от Солнца.

Когда Солнце было очень молодой звездой и светилось в основном за счёт гравитационного сжатия, его радиус был заметно больше нынешнего. Если бы в ту пору существовали планеты, то их приливное взаимодействие с Солнцем должно было происходить намного интенсивнее, чем сейчас.

А велико ли сегодня приливное влияние планет на Солнце?

Этот вопрос вызывает оживлённые дискуссии. Именно с планетными приливами некоторые исследователи пытаются связать периодические явления солнечной активности. Возможно некоторые читатели помнят всеобщее напряжение, которое вызвал в марте 1982 г. так называемый парад планет. Действительно, тогда наблюдалось довольно редкое явление — все 9 планет собрались по одну сторону от Солнца. Это должно было привести к суммированию на поверхности Солнца приливных горбов от воздействия разных планет.

За рубежом некоторые любители сенсаций (в основном журналисты, но были среди них и учёные) даже предсказали катастрофические явления на Земле, которые якобы будут вызваны этим парадом планет. В действительности же ничего особенного не произошло. Связь между расположением планет и земными событиями, предлагавшаяся авторами сенсационных «теорий», выглядит довольно логично:

планеты → приливы → солнечная активность → Земля.

Но ни одно из звеньев такой взаимосвязи нельзя пока считать вполне понятным, а иллюстрацией этому как раз и служит неоправдавшееся предсказание.

Влияние солнечной активности на эволюцию земной биосферы, по-видимому, существует, но оно не столь уж однозначно. Нет сомнений, что планеты вызывают приливы на Солнце, но не ясно, каким образом откликается сложная колебательная система «Солнце» на приливное воздействие планет (солнечная сейсмология ещё только зарождается). Наконец, совсем уж не очевидно, какое влияние могут оказать приливы на солнечную активность. С одной стороны, они приводят к выделению дополнительной энергии в конвективной оболочке Солнца, с другой — разрушают её структуру, а вместе с ней и структуру магнитного поля, которое, как известно, играет важную роль в энергетических процессах на поверхности Солнца.

Таблица 3

Высоты статических планетных приливов на Солнце и на Земле

Планета	Приливы на Солнце		Приливы на Земле	
	$\Delta R/R$	ΔR , см	$\Delta R/R$	ΔR , см
Меркурий	$6 \cdot 10^{-13}$	0,04	$4 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Венера	$1 \cdot 10^{-12}$	0,09	$6 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Земля	$6 \cdot 10^{-13}$	0,04	—	—
Марс	$2 \cdot 10^{-14}$	0,001	$6 \cdot 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{-5}$
Юпитер	$1 \cdot 10^{-13}$	0,095	$7 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Сатурн	$7 \cdot 10^{-14}$	0,005	$2 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Уран	$1 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Нептун	$4 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{-8}$
Плутон	$5 \cdot 10^{-20}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-20}$	$8 \cdot 10^{-12}$

В табл. 3 приведены относительные и абсолютные амплитуды статических планетных приливов на поверхности Солнца и Земли. Очевидно, что, даже «сложив» свои усилия, планеты могут вызвать на Солнце прилив высотой всего 3 мм. Правда, амплитуда приливных колебаний может возрасти, если собственная частота колебаний наружных слоёв Солнца попадёт в резонанс с частотой изменения приливообразующей силы планет. Относительно вращающейся поверхности Солнца планеты имеют период обращения 30—40 сут., значит, периоды их приливообразующих сил заключены в интервале 15—20 сут.

Однако не ясно, лежат ли собственные периоды колебания наружных слоёв Солнца в этом интервале. Колебательные явления на Солнце весьма разнообразны: наблюдаются колебания поверхности с периодами от нескольких минут до многих часов. На основные 11- и 22-летние циклы солнечной активности накладываются колебания

с периодом 3—6 мес., а также длительные 80—90-летние циклы. Поэтому надёжно сопоставить статистику этих явлений с приливным влиянием планет пока не удаётся. Сейчас можно лишь сказать, что планеты не оказывают решающего влияния на солнечную активность, но точно указать роль планетных приливов в жизни Солнца пока нельзя.

Ранее [17] мы уже касались вопроса о фигуре Солнца в связи с движением перигелия орбиты Меркурия. Некоторая сплюснутость Солнца, связанная с его вращением, могла бы вызвать медленный поворот перигелия внутренних планет. Существует и обратное влияние — планеты изменяют характер вращения Солнца. Известно, что солнечный экватор наклонён к плоскости земной орбиты примерно на 7° , меньший угол он составляет с плоскостью орбит Венеры (4°) и Меркурия (1°). Влияние планет приводит к прецессии оси вращения Солнца с периодом 1—2 млрд. лет. Около половины этого эффекта связано с притяжением Венеры, а вторая половина — с притяжением Меркурия и Земли. Влияние остальных планет значительно меньше.

Разумеется, приливные эффекты на Солнце не ограничиваются влиянием планет: в принципе, пролетающие мимо него звёзды способны создать значительно более сильное приливное возмущение. Правда, сближение Солнца с другими звёздами происходит крайне редко, зато последствия этого могут быть катастрофическими. В 1880 г. английский астроном Александр Уильям Бикертон (1842—1929) выдвинул гипотезу, что Солнечная система возникла от того, что рядом с Солнцем прошла звезда и своим притяжением вырвала из него вещество. Эту идею развил знаменитый английский астроном и физик Джеймс Джинс (1877—1946). В начале XX в. она была весьма популярной, но позже расчёты самого Джинса показали, что вероятность тесного сближения звёзд ничтожно мала, и от гипотезы звёздно-звёздного прилива отказались.

Однако хорошие идеи имеют свойство возрождаться. Исследования последних десятилетий убедили астрономов в том, что юность звёзд проходит в плотных звёздных скоплениях, где вероятность взаимного сближения светил довольно высока. А в самые последние годы астрономы открыли несколько десятков планетных систем у других звёзд и выяснилось, что почти все они резко отличаются от нашей Солнечной системы: в них планеты-гиганты расположены вблизи звезды, так что для планет земного типа остаётся лишь периферия системы. Возникла идея, что и Солнечная система когда-то была устроена похожим образом, но близкий пролёт посторонней звезды и вызванный ей «гравитационный удар» перевернул порядок планет: отодвинул от Солнца гиганты (Юпитер, Сатурн, ...) и приблизил к нему карликов (Земля, Венера, ...). Пока у этой гипотезы немного сторонников, но кто знает...

А теперь немного пофантазируем:

КАК ВОЙТИ В МАШИНУ ВРЕМЕНИ?

Путешествие во времени: это что — сказка или научная проблема, ждущая своего решения? Безусловно, это проблема науки, причём, уже частично решённая. Путешествия в п е р ё д во времени возможны и даже экспериментально проведены. Для этого требуется — в соответствии с теорией относительности Эйнштейна — околосветовая скорость перемещения в пространстве. Правда, пока такая скорость достижима лишь для микроскопических объектов, например, элементарных частиц в ускорителе. Для них темп течения времени замедляется во много раз, например, при скорости $V = 290\,000$ км/с он замедляется в 4 раза. В ускорителе элементарных частиц быстро распадающиеся мезоны совершают путешествие в будущее на значительно больший срок, чем им отпущено природой в состоянии покоя. Для макроскопических тел также проведены эксперименты с перемещением в будущее, например, на борту реактивного самолёта. Результаты этих экспериментов полностью согласуются с теорией относительности, но при существующих скоростях самолётов полёт в будущее происходит на столь малые интервалы времени, что измерить их удаётся лишь точнейшими атомными часами. Вот когда будут созданы субсветовые звездолёты, их экипажи в полной мере ощутят эффекты относительного замедления времени и смогут путешествовать в будущее на огромные времена. Скажем, некий космонавт отправится к спиральной галактике Туманность Андромеды, до которой около 2 млн. световых лет. Если он будет лететь туда и обратно с постоянным ускорением $2g$, то затратит на весь путь по собственным часам около 29 лет, а по земным часам к моменту его возвращения пройдёт около 4 млн. лет. (Тем, кто до сих пор не знал о возможности путешествий в будущее и о связанном с ними «парадоксе близнецов», советуем начать с популярных книг Ландау и Румера [4] и Гарднера [2], а осуществимость космических путешествий в будущее обсуждает Левантовский [5].)

А что можно сказать о путешествиях во времени н а з а д, и вообще, какое отношение имеют машины времени к приливам? Ответим сразу: ничего определённого о путешествиях назад во времени пока не известно; а раз так, то и неясно, имеют ли к ним отношение приливы. Но есть идея.

Специалисты по теории тяготения подозревают, что путешествия назад во времени возможны, причём «воротами во временной тоннель» могут служить... чёрные дыры! Первыми эту идею стали разрабатывать американский астрофизик Кип Торн со своими учениками, российский астрофизик Игорь Дмитриевич Новиков и их коллеги. О причудливой истории этих исследований и о том, как повлияли

на них романы Герберта Уэллса «Машина времени» (1895) и Карла Сагана «Контакт» (1985), вы можете прочитать в книге Игоря Новикова [8]. А я лишь замечу, что эта идея основывается на предположении о многосвязности пространственно-временной структуры Вселенной и о возможности создания в ней топологических тоннелей, сокращающих путь в пространстве между удалёнными точками. Эти гипотетические тоннели называют мостами Эйнштейна—Розена, или кротовыми норами, или червячными ходами (wormholes). Концы этих пространственно-временных тоннелей — *горловины Шварцшильда* — по внешним свойствам напоминают чёрные дыры, с той лишь разницей, что в них можно не только входить, но и выходить. Вот тут-то мы и вспомним о приливах, которые чрезвычайно сильны в окрестности чёрных дыр, и найдём массу таких чёрных дыр, которые безопасны для прохода сквозь них во временной тоннель человека.

Как известно, радиус чёрной дыры массой M , так называемый радиус Шварцшильда (r_g), определяется выражением

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}.$$

Это совершенно точное выражение, следующее из релятивистской теории гравитации, но получить его можно (хотя и не совсем «честно») в рамках ньютоновой физики, приравняв кинетическую энергию «частицы света» ($mc^2/2$) её гравитационной энергии связи на поверхности чёрной дыры (GMm/r_g). Вблизи этой поверхности на тело размером l действует приливное ускорение

$$\Delta a = \frac{2GMl}{r_g^3} = \frac{lc^6}{4G^2M^2}.$$

Очевидно, для человека ($l = 1$ м) верхняя граница сжимающего или растягивающего его тело ускорения близка к $\Delta a_{\max} = g = 9,8$ м/с². Отсюда получаем нижний предел массы чёрной дыры:

$$M_{\min} = \frac{c^3}{2G} \sqrt{\frac{l}{g}} = 6 \cdot 10^{34} \text{ кг} = 3 \cdot 10^4 M_{\odot}.$$

При значительно меньшей массе горловины Шварцшильда путешественник во времени рискует быть вытянутым в макаронину прежде, чем он пересечёт возделенную поверхность. А нужно заметить, что чёрная дыра с массой порядка $10^5 M_{\odot}$ — это далеко не рядовой объект Галактики. В результате нормальной эволюции звёзд такие объекты не формируются. Их присутствие подозревается в ядрах некоторых галактик, в том числе и нашей, но как они там образовались или как туда попали — пока не совсем ясно; вполне вероятно, что это результат ещё одного замечательного гравитационного явления — динамического трения [17].

Астрономические наблюдения весьма определённо указывают на присутствие в ядрах крупных галактик и квазаров чёрных дыр

с массами 10^6 — $10^9 M_{\odot}$. Служат ли они элементами транспортной системы во времени и пространстве — интригующий вопрос, положительный ответ на который может перевернуть наши представления о причинно-следственных отношениях и ещё о многом другом. Во всяком случае, если такая транспортная система существует и охватывает миллионы галактик в их далёком прошлом и настоящем, то и человеку туда вход не заказан, по крайней мере, мы легко выдержим возникающие при этом гравитационные приливные напряжения. Лишь бы обнаружить эти «кротовые норы», тогда уже ничто не остановит нас от проникновения в них: человека непременно толкнут туда могучие приливы любознательности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белецкий В. В. Очерки о движении космических тел. — М.: Наука, 1972, 1977.
- [2] Гарднер М. Теория относительности для миллионов. — М.: Атомиздат, 1965, 1967, 1979.
- [3] Дарвин Дж. Г. Приливы и родственные им явления в Солнечной системе. — М.: Наука, 1965.
- [4] Ландау Л. Д., Румер Ю. Б. Что такое теория относительности. — М.: Советская Россия, 1959, 1963, 1975.
- [5] Левантовский В. И. Механика космического полёта в элементарном изложении. — М.: Наука, 1980.
- [6] Мельхиор П. Земные приливы. — М.: Мир, 1968.
- [7] Мельхиор П. Физика и динамика планет. — М.: Мир, 1975.
- [8] Новиков И. Д. Куда течёт река времени?. — М.: Молодая гвардия, 1990.
- [9] Пантелеев В. Л. Физика Земли и планет: Курс лекций. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, 2001.
<http://www.astronet.ru/>
- [10] Приливы и отливы // Энциклопедия Кругосвет. — М., 2002.
<http://www.krugosvet.ru/>
- [11] Приливы и резонансы в Солнечной системе. — М.: Мир, 1975.
- [12] Рогачёв К. А. Плынья на банке Кашеварова // Природа. 2001. № 3. С. 33—38.
- [13] Рой А. Движение по орбитам. — М.: Мир, 1981.
- [14] Сурдин В. Г. Приливные явления во Вселенной. — М.: Знание, 1986.
- [15] Сурдин В. Г. Рождение двойных звёзд // Соросовский образовательный журнал. 2001. № 8. С. 68—74.
- [16] Сурдин В. Г. Судьба звёздных скоплений // Природа. 2001. № 4. С. 44—50.
- [17] Сурдин В. Г. Динамика звёздных систем. — М.: МЦНМО, 2001.—(Библиотека «Математическое просвещение». Вып. 12).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Существует ли пятая сила?	3
Приливы — это серьёзно	5
Теория приливов	8
Приливы на Земле	14
Банка Кашеварова (18). Прецессия и нутация (20). Приливы над Землёй (21). Космическая гантель (23).	
Система «Земля—Луна»: лаборатория приливов	25
Загадки Меркурия и Венеры	27
Юпитер и все-все-все	30
Планеты влияют на Солнце?	34
Как войти в машину времени?	37
Литература	39

БИБЛИОТЕКА «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОСВЕЩЕНИЕ»

ВЫПУСК 1
В. М. Тихомиров. Великие математики прошлого и их великие теоремы.

ВЫПУСК 2
А. А. Болибрух. Проблемы Гильберта (100 лет спустя).

ВЫПУСК 3
Д. В. Аносов. Взгляд на математику и нечто из неё.

ВЫПУСК 4
В. В. Прасолов. Точки Брокера и изогональное сопряжение.

ВЫПУСК 5
Н. П. Долбилин. Жемчужины теории многогранников.

ВЫПУСК 6
А. Б. Сосинский. Мыльные плёнки и случайные блуждания.

ВЫПУСК 7
И. М. Парамонова. Симметрия в математике.

ВЫПУСК 8
В. В. Острик, М. А. Цфасман. Алгебраическая геометрия и теория чисел: рациональные и эллиптические кривые.

ВЫПУСК 9
Б. П. Гейдман. Площади многоугольников.

ВЫПУСК 10
А. Б. Сосинский. Узлы и косы.

ВЫПУСК 11
Э. Б. Винберг. Симметрия многочленов.

ВЫПУСК 12
В. Г. Сурдин. Динамика звёздных систем.

ВЫПУСК 13
В. О. Бугаенко. Уравнения Пелля.

ВЫПУСК 14
В. И. Арнольд. Цепные дроби.

ВЫПУСК 15
В. М. Тихомиров. Дифференциальное исчисление (теория и приложения).

ВЫПУСК 16
В. А. Скворцов. Примеры метрических пространств.

ВЫПУСК 17
В. Г. Сурдин. Пятая сила.

ISBN 5-94057-027-5



9 785940 570271