

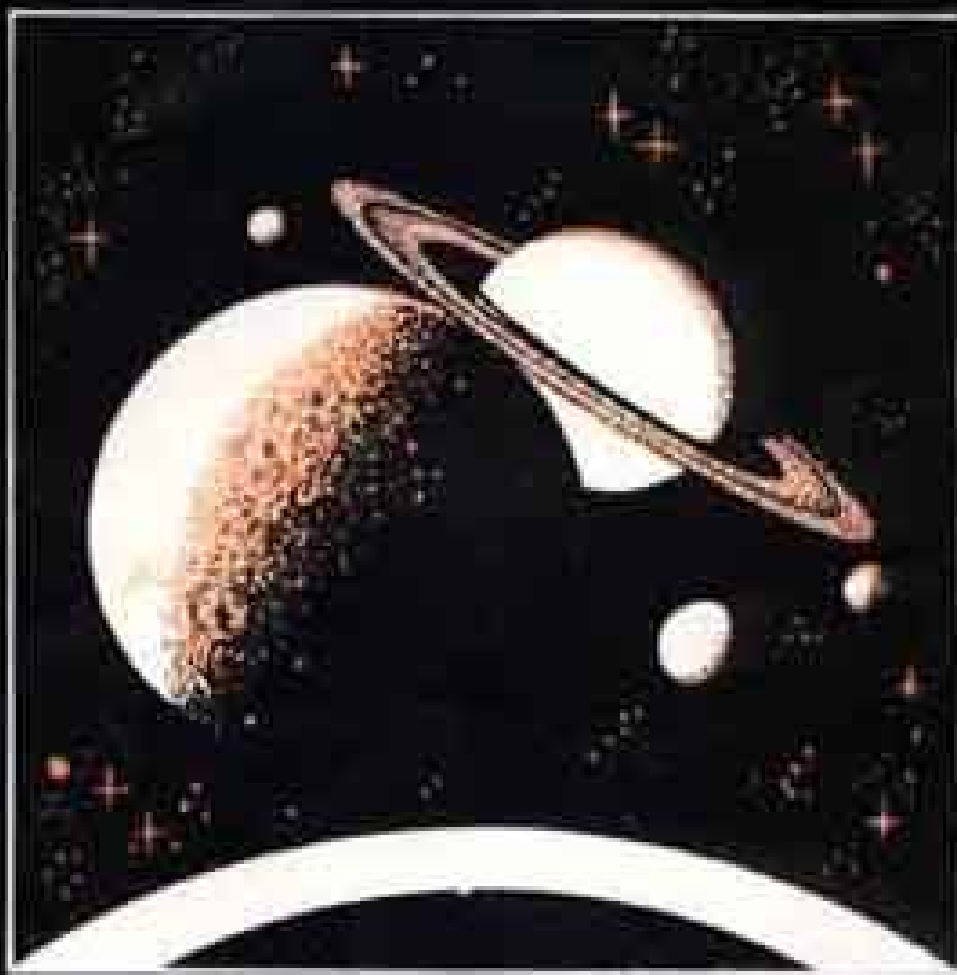
# КОСМОНАВТИКА. АСТРОНОМИЯ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1987/6

**Л.В.Ксанфомалити**  
**СПУТНИКИ**  
**ВНЕШНИХ ПЛАНЕТ**  
**И ПЛУТОН**



**ЗНАНИЕ**

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

# **КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ**

6/1987

Издается ежемесячно с 1971 г.

**Л. В. Ксанфомалити,**  
доктор физико-математических наук

## **СПУТНИКИ ВНЕШНИХ ПЛАНЕТ И ПЛУТОН**

**в приложении этого номера:  
НОВОСТИ АСТРОНОМИИ**



Издательство «Знамя» Москва 1987

**Ксанфомалити Л.В.**

**Спутники внешних планет  
и Плутон**

- \* Введение
- \* Спутники Юпитера
- \* Спутники Сатурна
- \* Загадка спутников Урана
- \* Спутники Нептуна
- \* Плутон и Харон

**Новости астрономии**

## ВВЕДЕНИЕ

Планеты Солнечной системы принято делить на внутренние и внешние или планеты группы Земли и планеты-гиганты, каждая со своей системой спутников. Вторая половина XX в. с бурным развитием космических исследований внесла много поправок и уточнений в классификацию этих небесных тел. В самостоятельную группу выделились очень многочисленные «ледяные» спутники планет-гигантов и близкие к ним по природе планета Плутон и спутник Харон.

В этой брошюре приводятся последние данные о главных особенностях и «населении» спутниковых систем Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона. Вместе с тем нельзя не рассказать немного подробнее об уникальных свойствах хотя бы некоторых из них — настолько они своеобразны и необычны. Таковы спутники Юпитера Ио и Европа, спутники Сатурна Титан и Энцелад, спутник Урана Миранда и многие другие. Название «ледяные» спутники не вполне правильно относить ко всем этим телам. Например, на Ио водяной лед практически отсутствует, а в составе многих других спутников имеются заметные количества силикатов. Тем не менее образное название «ледяные» спутники постепенно прижилось и хорошо характеризует внешние слои и даже всю кору этих спутников.

В Солнечной системе ныне известно 54 естественных спутника планет. Четыре крупнейших спутника Юпитера относятся к семи самым большим. Их называют галилеевыми, потому что их открыл в XVII в. Галилей в только что изготовленную им зрительную трубу. Семь спутников, включая нашу Луну, имеют диаметр больше 3000 км. Еще 3 спутника имеют диаметр больше 1500 км. Самый крупный спутник, Ганимед, относится к семейству Юпитера. Его диаметр даже превышает диаметр планеты Меркурий, но благодаря ледяной природе масса Ганимеда в 2,2 раза меньше. Галилеевым спутникам в брошюре уделено много внимания.

Из-за небольшого объема брошюры за ее рамками остались такие интересные проблемы, как подробности происхождения спутников, их существование на критических орбитах (у предела Роша) и др. Ограниченные полиграфические возможности не позволяют также показать на страницах брошюры подробные телевизионные фотографии этих тел, а тем более показать их в цвете. Но многие из них публиковались в отечественных периодических и специальных изданиях, они демонстрируются во время лекций в планетариях и в научных докладах. На первой странице обложки показана часть семейства Сатурна, а на четвертой странице — спутник Юпитера Ио (вверху справа), поверхность Ганимеда (внизу), а также спутник Урана Миранда.

В 1972 и 1973 гг. к Юпитеру были направлены первые исследовательские аппараты «Пионер-10» и «Пионер-11», впоследствии переименованный в «Пионер-Сатурн». В конце 1973 г. «Пионер-10», а через год — «Пионер-Сатурн» сблизилась с Юпитером. Подходили они к нему по разным трассам, которые в дальнейшем определили судьбу этих аппаратов. Благодаря гравитационному маневру в поле Юпитера «Пионер-Сатурн» поднялся над Северным полушарием планеты и направился к шестой планете — Сатурну. «Пионер-10» после сближения с Юпитером уходит из Солнечной системы, а «Пионер-Сатурн» в 1979 г. сблизился с Сатурном, после чего также перешел на трассу ухода. Основные результаты, приводимые в брошюре, получены с помощью более совершенных космических аппаратов «Вояджер-1» и «Вояджер-2»

(Автор считает, что используемое в брошюрах этой серии название «Вояджер» не совсем правильно, и использует здесь более употребимое «Вояджер».)

Аппараты были запущены в США осенью 1977 г. и достигли планеты Юпитер в 1979 г. После выполнения исследовательской программы у Юпитера и подробных исследований его спутников аппараты совершили гравитационный маневр (с использованием поля тяготения Юпитера), что позволило направить их к Сатурну, которого они достигли по несколько различающимся траекториям соответственно в 1980 и 1981 гг. Здесь также

изучались спутники и сама планета, но программа «Вояджера-2» в последний момент была несколько сокращена из-за неполадок на борту.

Далее «Вояджер-1» лег на трассу ухода из Солнечной системы, а «Вояджер-2» проделал еще один гравитационный маневр и, несмотря на некоторые возникшие технические проблемы, был направлен к седьмой планете — Урану. Встреча с Ураном состоялась в начале 1986 г. После исследования Урана и его спутников «Вояджер-2» сохранил работоспособность, чему значительно способствовало перепрограммирование его управляющих систем. После сближения с Ураном снова был выполнен гравитационный маневр, и «Вояджер-2» лег на трассу полета к Нептуну.

Ожидается, что через 3,5 года после пролета Урана аппарат достигнет Нептуна (1989 г.) и на этом завершит планетную часть своей миссии. Такой последовательный облет за сравнительно короткое время возможен лишь благодаря определенному расположению планет-гигантов в относительно узком секторе неба. Повторение такого «парада планет» произойдет лишь через несколько сотен лет.

## СПУТНИКИ ЮПИТЕРА

Из множества спутников Юпитера, перечисленных в табл. 1, выделяются 4 галилеевых спутника, известных со времен Галилея. В табл. 1, где приведено 16 известных ныне спутников планеты, они занимают с 5-й по 8-ю строку. Это Ио (имя женского рода), Европа, Ганимед и Каллисто. Они выделяются большими размерами (от размеров Луны до размеров Меркурия) и близостью к планете. Известны еще более близкие к Юпитеру спутники: это 3 совсем маленьких тела, открытых за последние годы, и Амальтея, имеющая неправильную форму (ее размеры примерно 130x80 км). Вместе с ними галилеевы спутники образуют так называемую правильную систему, которая отличается компланарностью (расположением орбит спутников в плоскости экватора планеты) и почти круговой формой орбит. Если сравнить их с положением нашей Луны, то Ио находится на 10% дальше, а Каллисто — в 4,9 раза дальше Луны. Но из-за огромной массы Юпитера на один оборот вокруг планеты они затрачивают всего 1,8 и 16,7 сут.

Таблица 1 Спутники Юпитера

Название или обозначение	Радиус орбиты, тыс. км	Орбитальн. период, сут	Эксцентриситет орбиты	Наклон. орбиты к экватору планеты, град.	Радиус спутника, км.	Год открытия
XVI (Метис)	127,96	0,295	(0)	(0)	20	1979
XV (Адрастея)	128,98	0,298	(0)	(0)	12x10x8	1979
Амальтея	181,3	0,498	0,003	0,45	135x85x75	1892
Теба	221,4	0,675	0,013	(0,9)	55x45	1979
Ио	421,6	1,769	0,004	0,04	1815	1610
Европа	670,9	3,551	0,009	0,47	1569	1610
Ганимед	1070	7,155	0,002	0,21	2631	1610
Каллисто	1880	16,689	0,007	0,51	2400	1610
Леда	11094	238,7	0,148	26,1	(5)	1974
Гималия	11480	250,6	0,158	27,6	(90)	1904
Лиситея	11720	259,2	0,107	29	(10)	1938
Элара	11737	259,7	0,207	24,8	(40)	1904
Ананке	21200	631	0,17	147	(10)	1951
Карме	22600	692	0,21	164	(15)	1938
Пасифае	23500	735	0,38	145	(20)	1908
Синопе	23700	758	0,28	153	(15)	1914

Знакомство с системой Юпитера начнем именно с галилеевых спутников. Со времени их открытия они оставались одним из самых популярных объектов астрономических наблюдений. Но если бы астрономы тогда знали, какие чудеса таятся на этих небесных телах! Впрочем, начнем с небольшого отступления, касающегося галилеевых спутников. История науки полна великолепных идей, поражающих своей простотой и изяществом. Одна из них относится к концу XVII в., когда определение скорости света становилось все более актуальной задачей. Идея принадлежала датскому астроному Оле Ремеру. Ремер сообразил, что движение галилеевых спутников Юпитера (других тогда не знали) можно использовать для определения скорости света. Параметры их движения уже тогда были хорошо известны. Взаимное положение спутников и их положение относительно Юпитера, которые легко рассчитать заранее, можно условно рассматривать как положение четырех стрелок неких воображаемых часов. Ход этих часов очень точен; в свое время отсутствие хороших хронометров даже подтолкнуло мореплавателей пользоваться этими небесными часами для нужд навигации.

Но идея, о которой мы рассказываем, красивее. Пусть взаимное положение «стрелок»-спутников найдено, скажем, на момент противостояния (которые повторяются каждые 400 сут) и далее рассчитано на некоторое время вперед. Вскоре наблюдения покажут, что небесные часы... врут. Их отставание будет расти с каждыми сутками и на 200-е сутки достигнет 16,7 мин. Затем отставание станет уменьшаться и постепенно исчезнет совсем. Нетрудно догадаться, в чем дело: «часы-то идут точно, но когда наблюдатель вместе с Землей перемещается на противоположную от Юпитера сторону орбиты, он видит положение «стрелок», которое соответствует моменту времени на 16,7 мин раньше, чем по его часам. Если он знает радиус земной орбиты, т. е. астрономическую единицу (149,6 млн. км), скорость света в его руках: 16,7 мин — время распространения света на 2 а. е. К сожалению, астрономическая единица Ремеру была известна неточно, и скорость света им была определена с большой ошибкой. Но идея, несомненно, была очень красивой. В наше время, наблюдение галилеевых спутников принесло новые проблемы, связанные прежде всего с Ио. Еще средствами наземной астрономии в пространстве вблизи Ио было обнаружено излучение натрия и некоторых других элементов, что не находило объяснения до начала космических исследований Ио.

На рис. 1 приведена схема орбит галилеевых спутников и Амальтеи, а также путь космического аппарата «Пионер» относительно планеты и спутников. При сближении аппарата с Ио было сделано важное открытие, к которому мы теперь и перейдем.

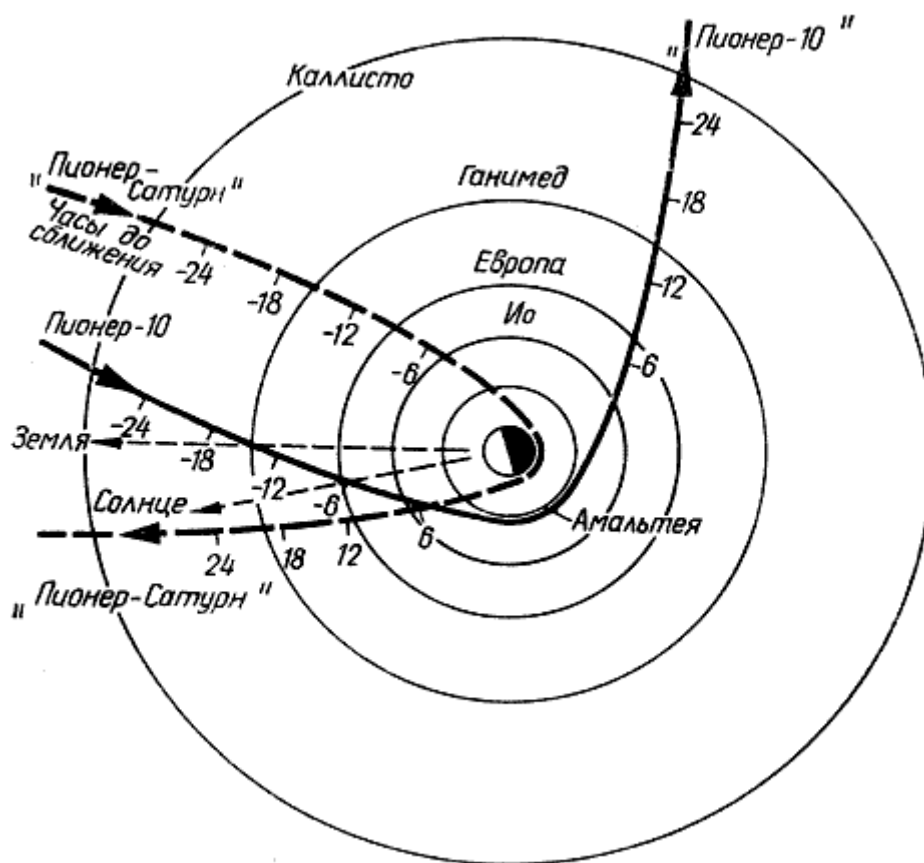


Рис. 1. Схема спутниковой системы Юпитера

## Ио.

Краткая история исследований космоса полна забавных, а иногда и невеселых происшествий, недоразумений и неожиданных открытий. Постепенно возник некий фольклор, которым специалисты обмениваются при встречах. Часто он связан с неожиданностями в поведении космических аппаратов. Недаром в кругах исследователей космоса родилась полушутливая, полусерьезная формулировка закона Мерфи— Чизехолма: «Все, что может испортиться, — портится. Все, что не может испортиться, портится тоже». Одна из сугубо научных статей в журнале «Сайенс» так и начиналась: «В соответствии с законом Мерфи...» Но к счастью, бывает и наоборот. Случай, о котором мы расскажем, скорее относится к такому удивительному везению. Трудно сказать, сколько здесь правды, но научная канва этой истории вполне достоверна.

Точному знанию положения космического аппарата у далекой от Земли планеты способствуют не только средства радионавигации, но и передаваемые аппаратом телевизионные изображения, на которых видны спутники на фоне звезд. Получаемые относительные положения небесных тел вводятся в вычислительную машину, которая уточняет координаты аппарата.

Одна из легенд рассказывает, что когда «Вояджер-1» приближался к Юпитеру, ЭВМ указала руководительнице эксперимента на ошибку во вводимой в ЭВМ магнитной ленте с записью изображения спутника Ио. Причина была непонятной, но в конце концов ученой удалось выяснить, что форма лимба Ио не соответствовала заложенным в ЭВМ представлениям о круглом небесном теле. Сбоку у Ио что-то выступало. Это «что-то» впоследствии оказалось огромным газовым султаном, который поднимался на высоту около 250—300 км над действующим вулканом.

Следует сказать, что Ио давно удивляет астрономов. Мы уже говорили, что несколько лет назад вдоль орбиты Ио было обнаружено излучение кислорода, паров натрия и серы. Как

сохраняется такой тор («бублик») в пространстве? Вначале ученым показалось, что все объяснили телевизионные снимки Ио: 7—8 действующих вулканов на ее поверхности выбрасывают фонтаны газообразных веществ, поднимающихся на сотни километров. Бледно-оранжевый цвет некоторых участков поверхности Ио вызван, по-видимому, отложениями серы и сконденсированного сернистого газа. Если предположить, что часть продуктов извержений рассеивается в космосе, происхождение газового тора вдоль орбиты Ио находит объяснение.

Но дело в том, что Ио — довольно массивное небесное тело: его масса  $8,92 \times 10^{25}$  г (это на 20% больше массы Луны), а средняя плотность составляет  $3,53$  г/см<sup>3</sup>. Диаметр Ио 3620 км (Луны 3476 км). Расчеты показывают, что ускорение свободного падения на ее поверхности достаточно велико,  $181$  см/с<sup>2</sup>. Тяжелый сернистый газ, а также пары серы, выброшенные из вулканической кальдеры, из-за низкой температуры быстро конденсируются и в таком виде, как иней и снег, выпадают на поверхность Ио. Этот процесс опережает разрушение молекулы газа ультрафиолетовым излучением Солнца (фотодиссоциацию). В то же время ускорение свободного падения недостаточно, чтобы удержать такую атмосферу, как у Марса, хотя какие-то следы атмосферы Ио имеет. Выброс газа на высоту несколько сотен километров требует скоростей истечения газа из жерла примерно 1 км/с. Высокой скорости истечения способствует ничтожная плотность атмосферы Ио: от 10 до 100 миллионов раз меньше, чем у поверхности Земли. По земным понятиям — это глубочайший вакуум. Но концентрация молекул не так уж мала, около  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>. У всех остальных спутников Юпитера, Сатурна и Урана, как и у планеты Меркурий, плотность атмосферы еще в миллиарды раз ниже. Попросту говоря, атмосферы у них нет. Исключение — спутник Сатурна Титан, о котором речь будет дальше. Отложим немного разгадку, как сера и натрий попадают в космос и образуют тор из нейтральных и ионизированных атомов и обратимся к удивительному механизму извержений на Ио. Ио недостаточно велика, чтобы радиоактивный распад элементов в ее недрах вызвал сильный разогрев коры, как это происходит на Земле. Энергия для разогрева черпается совсем из другого источника: из приливных воздействий второго галилеева спутника, Европы, самого Юпитера и в небольшой степени третьего спутника — Ганимеда. Подобно тому как в атомах запрещены определенные сочетания состояний электронных оболочек, в системе Юпитера запрещены (хотя и по другим причинам) некоторые конфигурации (взаимные расположения) спутников. Как только Ио приближается к определенной точке относительно Европы и Ганимеда, влияние последних начинает искажать орбиту Ио. За каждый оборот Ио дважды изменяет орбиту, смещаясь радиально на 10 км «вверх» и «вниз». Орбита становится не совсем круговой, хотя эксцентриситет всего 0,004. Ио имеет значительный приливный выступ (отличие от сферичности) и при движении вдоль орбиты испытывает сильную либрацию (покачивание), хотя, подобно другим галилеевым спутникам, находится в синхронном вращении, т. е. всегда обращена одной стороной к Юпитеру.

Приливные силы изгибают литосферу Ио и разогревают ее подобно тому, как нагревается изгибаемая проволока. Благодаря приливным воздействиям в недрах Ио выделяется огромная энергия — 60—80 млн. МВт. По-видимому, она распределяется неравномерно, больше выделяется в приповерхностных слоях небесного тела. В результате рассеяния этой энергии движение всех трех тел постепенно замедляется, но происходит это чрезвычайно медленно.

Нечасто бывает, чтобы предсказание теории нашло подтверждение всего через 2 месяца, но в случае Ио было именно так. Ее вулканические извержения были предсказаны на основе анализа взаимных возмущений галилеевых спутников. Предсказание было опубликовано незадолго до сближения с Ио «Вояджера». Мощность, рассеиваемая в приливных возмущениях Ио, достигает  $2$  Вт/м<sup>2</sup> — это в 30 раз больше тепла, чем выделяется через поверхность Земли. Дистанционные измерения температуры поверхности, которая при равновесии с получаемой от Солнца энергией должна



составлять примерно 140 К в районе экватора Ио, привели к совсем удивительным результатам. Равнины, покрытые слоем белых отложений, имеют даже более низкую температуру, 130 К. Это понятно: высокое альbedo поверхности уменьшает количество поглощаемой энергии.

Вместе с тем около 2% поверхности занимают активные горячие пятна. Их насчитывается более 10. Температура в пятнах 310, 400 и даже 600 К, причем размеры пятен колеблются в пределах от 75 до 250 км. «Вояджер-1» застал 8 активных гигантских извержений, места которых были отождествлены с горячими пятнами. Сблизившийся с Ио через 4 месяца «Вояджер-2» обнаружил, что 7 из них все еще продолжают извергаться. «Выключился» только один из наиболее крупных вулканов, получивший название Пеле (в честь бога вулканов). В 1979 г. в точке, которая оказалась вулканической кальдерой Пеле, была зарегистрирована наивысшая температура, 600 К.

Интересно отметить, что центр извержения почему-то темный, а в стороны распространяются оранжевые потоки — продукты извержений. По-видимому, они накапливаются в глубинных резервуарах расплавленных веществ, как это показывает схема на рис. 2. Есть признаки того, что продолжительность существования вулканической кальдеры тем больше, чем из более глубоких резервуаров происходит извержение.

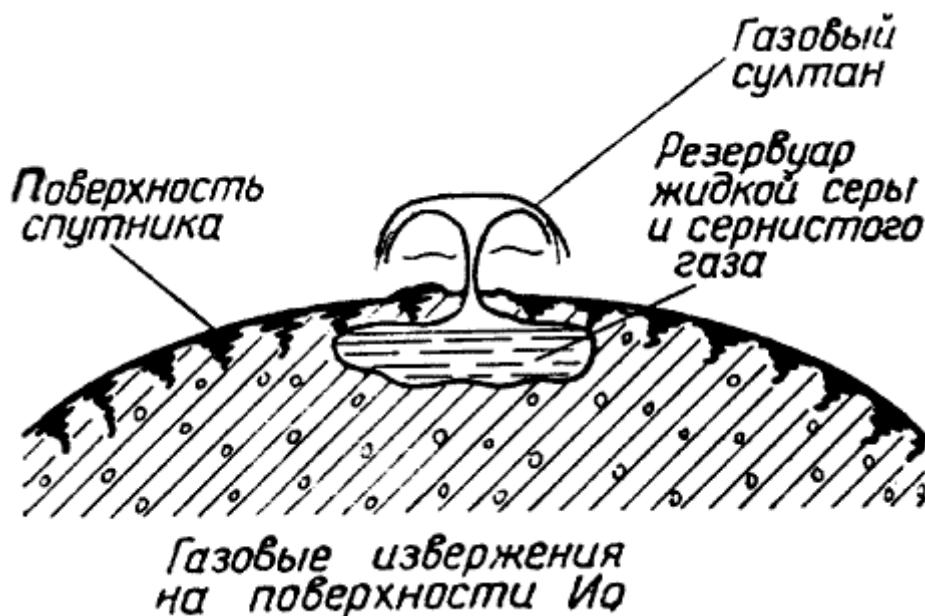


Рис. 2. Резервуары жидкой серы и конденсата сернистого газа на Ио

Вулканы Ио делятся на несколько типов. Первые имеют температуру 350—400 К и скорость выброса газовых продуктов около 500 м/с. Высота газового султана достигает 100 км и более, а выпадающие осадки имеют белый цвет. Таких большинство. Вторые отличаются очень высокой температурой кальдеры, имеют скорость выбросов около 1 км/с и высоту султана до 300 км. Главная их особенность — темная кольцевая окантовка на расстояниях нескольких сотен километров от кальдер, к ним относится Пеле и найденные позднее Сурт и Атен. Кольцо газоконденсатной природы вокруг Пеле имеет характерную форму следа подковы диаметром около 1000 км, а отложения на поверхности составили эллипс размерами 950x1400 км. В центре извержения расположено несколько обширных плоскогорий с обрывистыми краями и разделяющей их широкой долиной. Вся поверхность имеет темные оттенки оранжевого и коричневого цветов. Лишь плоскогорье выделяется более светлой окраской.

Среди интересных гипотез имеется предположение о гейзерном характере извержений второго типа, когда происходит внезапный фазовый переход летучих веществ (жидкость — газ). Такой фазовый переход в глубинном резервуаре известен для земных вулканов, например, острова Св. Елены. Для сернистого газа переход должен происходить при температуре 400 К, а для серы примерно при температуре 700 К. Если принять эту гипотезу, малые султаны соответствуют выбросам с небольших глубин, большие — выбросам из глубоких резервуаров.

Состав продуктов извержений (сера, сернистый газ и некоторые сульфиды) присутствует и в вулканических извержениях на Земле, но к основным составляющим извержений не относится. Чтобы судить о реальной мощности вулканизма на Ио, важно знать, много ли вещества выбрасывается в извержениях, для чего можно воспользоваться сведениями о возрасте поверхности. В свою очередь, для оценки (относительной) возраста поверхности небесных тел широко используется метод подсчета количества метеоритных кратеров, приходящихся на единицу поверхности. Метод дает оценку возраста, если, конечно, известна средняя плотность метеоритной бомбардировки (о некоторых трудностях такой оценки мы расскажем в разделе, посвященном Каллисто).

По отсутствию метеоритных кратеров на поверхности Ио было установлено, что поверхность эта очень молодая, около 1 млн. лет. Ее составляют продукты извержений. Из-за низкой температуры конденсации отложения конденсатов, как серы, так и сернистого ангидрида, сохраняются очень долго. Толщина слоя отложений оценивается от 3—4 до 20—30 км. В извержениях выбрасываются также силикатные магмы — возможно, таково происхождение темных пятен на поверхности Ио.

Общее количество вулканических кальдер на поверхности Ио, в том числе горячих, несколько десятков, но действующих, как уже говорилось, гораздо меньше. Общая площадь вулканических кальдер составляет примерно 2% территории спутника. Все они довольно мелкие (по глубине).

Необычный вид имеет вулканический объект, получивший название Патера Ра.

Отходящие радиально от него змеевидные потоки простираются на расстояния до 200 км, изменяя оттенки от коричневого до светло-оранжевого и снежно-белого тонов. Природа вулканических потоков остается непонятной, как и еще более загадочные объекты — лавовые озера, к которым мы теперь перейдем. На их примере можно также кое-что узнать о времени жизни крупных извержений.

Самый сильный сигнал был зарегистрирован тепловыми радиометрами «Вояджер» от не вполне понятного объекта, который получил имя Локи. На телевизионных снимках с высоким разрешением он предстает как слегка срезанное круглое (кольцевое) образование темного оттенка; в центре его имеется угловатой формы светло-желтый объект размерами примерно в половину всего образования, которое само имеет размер 250 км. По-видимому, темный объект представляет собой озеро расплавленной серы, в центре которого плавает 100-километровый «айсберг» из твердой серы! Вокруг него на темном фоне видны более мелкие обломки того же светлого материала. Примерно в 300 км севернее центра Локи проходит слегка наклонный разлом (трещина), длиной около 200 км, с таким же темным дном, имеющий в центре примерно такой же «айсберг». (Виды Локи на снимках первого и второго аппаратов несколько различаются.) С обеих сторон трещины в небо Ио на высоту 250 км бьют два мощных белых газовых султана, выделяющихся на фоне светло-серой поверхности. Измерения показывают, что жидкий темный материал кальдеры Локи не такой уж темный, он светлее поверхности Луны. Район Локи давал основной тепловой поток при пролете и «Вояджера-1» и «Вояджера-2» в 1979 г. Но этим дело не ограничилось. Наземные телескопические наблюдения вскоре также позволили зарегистрировать мощный тепловой поток, который появлялся, когда Ио входила в тень Юпитера. Потом вспомнили, что такое же явление наблюдалось лет за 15 до того и осталось загадкой. Как часто ученых обманывают обстоятельства, что отмечается в известной поговорке, пришедшей еще от древних греков: «После того — не

значит вследствие того!» Если бы миллионы мегаватт рассеянной энергии излучались всей поверхностью Ио, температура спутника возросла бы всего на 2 К. Здесь же излучал определенно горячий район относительно небольших размеров.

Сопоставление показало также, что источники излучения распределены по поверхности очень неравномерно, появляются и исчезают при вращении спутника, а появление горячих пятен при затмении Юпитером Солнца объясняется попросту тем, что именно в это время мы видим постоянно обращенную к Юпитеру сторону спутника, где расположен... кратер Локи. Дальнейшие наземные исследования показали, что тепловое излучение Ио в течение всех последующих лет неизменно» резко возрастает, как только становится виден меридиан  $300\text{—}306^\circ$  з. д., т. е. Локи. Его вклад в излучение Ио составляет половину.

В самое последнее время появился новый метод исследований — тепловая поляриметрия. Эти исследования показали, что излучение исходит от гладкой поверхности, расположенной на  $13^\circ$  с. ш. и  $303^\circ$  з. д. С учетом ошибки  $\pm 5^\circ$ , указанной авторами, это снова координаты Локи ( $16\text{—}19^\circ$  с. ш.,  $300\text{—}306^\circ$  з. д.). Ученых чрезвычайно интересует, сколько же лет может непрерывно происходить это извержение?

Разные цветовые оттенки поверхности Ио указывают, что, кроме серы и сконденсированного сернистого газа, там имеются и другие составляющие. Цвет отложений серы также зависит от температуры и может быть белым, желтым, красным, коричневым и даже черным. Широкий выбор цветов могут дать также полисульфиды. Чего определенно нет ни на поверхности Ио, ни в ее вулканических выбросах — это воды, ее снега или инея. А именно вода составляет основную массу вулканических выбросов на Земле. Сейчас воды на Ио, по-видимому, нет совсем. Но всегда ли спутник был безводным или его запасы воды растеряны в извержениях? Этот вопрос еще ждет своего решения, особенно если учесть, что Ганимед и Каллисто на 50—60% состоят из водяного льда и, возможно, жидкой водяной мантии.

Несколько слов о рельефе Ио. Он в основном равнинный. Кроме гор в центре комплекса Пеле, есть еще несколько крупных массивов. Имеются высокие горы у южного полюса, занимающие площадь около  $150 \times 80$  км. Интересный объект обнаружен на телевизионных снимках: это гора высотой до 2,5 км с диаметром основания около 85 км, конической формы, которую специалисты относят к щитовым вулканам (отличающимся очень текучими лавами) и которые характеризуются совсем другим типом извержений. Здесь было бы уместно перейти к внутреннему устройству Ио, но у специалистов оно вызывает так много споров, что мы ограничимся лишь общей схемой галилеевых спутников, которую рассмотрим несколькими страницами ниже.

Орбита Ио расположена в той части магнитосферы Юпитера, где потоки заряженных частиц особенно плотны — в центре радиационного пояса. Эта часть магнитосферы напоминает 100-кратно увеличенные в размерах радиационные пояса Земли. Плазма здесь сосредоточена в объеме, весьма приближенно имеющем вид диска, который жестко связан с вращающимся магнитным полем планеты. Наряду с протонами и электронами в радиационных поясах Юпитера найдены ионы серы, кислорода и других элементов.

Поскольку магнитосфера вращается быстро, часть заряженных частиц выбрасывается из нее центробежными силами и движется в межпланетной среде в виде медленного компонента космических лучей, пульсирующего с периодом вращения Юпитера (9 ч 55,5 мин). На орбите Ио находится тор горячей плазмы с температурой до  $5 \times 10^4$  К.

Электрические и магнитные явления очень интенсивны в магнитосфере Юпитера. Среди чудес природы — мощный естественный электрический генератор, составная часть которого — спутник Ио. Только, пожалуй, «мощный» — не то слово. Между Юпитером и Ио течет ток в 5 млн. А. Мощность этой энергосистемы в 20 раз превышает суммарную мощность всех земных электростанций. Механизм, с помощью которого вырабатывается эта фантастическая мощность, по-видимому, связан с весьма своеобразной структурой так называемых токовых оболочек в плазмосфере Юпитера (рис. 3). Интересно отметить, что

такая структура давно была предсказана известным шведским ученым Х. Альфвенем для протопланетной туманности. Высказано предположение, что сильные электрические токи у поверхности Ио могут благодаря самостягиванию разряда (пинч-эффекту) концентрироваться на малой площади. Не связаны ли извержения с таким продолжительным прожигающим электрическим разрядом?

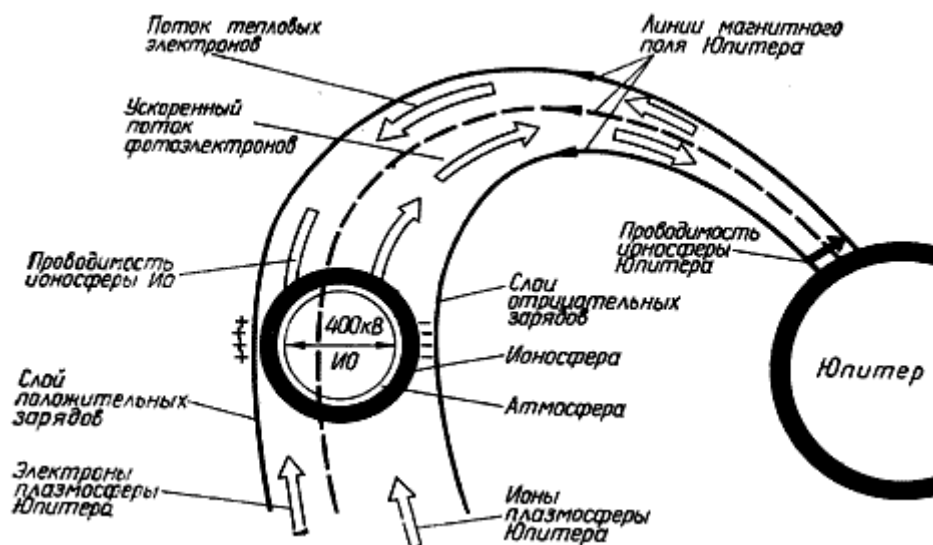


Рис. 3. «Природный ускоритель» заряженных частиц (Ио)

Ио активно взаимодействует с магнитосферой и самим тором, перемешивая частицы средних и низких энергий и поглощая частицы высоких энергий. По-видимому, Ио «работает» как одна из частей гигантского природного ускорителя заряженных частиц. Электрические процессы в магнитосфере на уровне орбиты Ио связаны с радиоизлучением, приходящим с Юпитера в дециметровом диапазоне. Еще в 1964 г. было доказано, что оно определенно зависит от положения Ио: вероятность регистрации радиоизлучения наибольшая, когда Ио оказывается на максимальном угловом расстоянии от Юпитера, если смотреть с Земли. В меньшей степени такую же зависимость показывают Европа и Ганимед. Космическими аппаратами было зарегистрировано и более длинноволновое излучение — в диапазоне от 0,3 до 30 км. Оно также, по-видимому, генерируется в плазменном торе на орбите Ио.

Тор вращается со скоростью, почти равной скорости магнитосферы, поэтому частицы в нем движутся намного быстрее, чем Ио. Их относительная скорость достигает 57 км/с, что вызывает интенсивную бомбардировку поверхности спутника и ежесекундно выбивает из нее примерно 1—2 т сернистого газа, который поступает в тор уже в виде однократно и двукратно ионизованных атомов серы и ионизованного кислорода. Измерения показали, что из тора исходит интенсивное излучение сильно ионизованных паров серы на длинах волн 953 и 672 нм и что температура плазмы в торе достигает 50—100 тыс. К. Это означает, что в тор накачивается огромная энергия порядка 500 тыс. МВт, причем механизм поступления этой энергии в газовое кольцо остается неизвестным. На орбите находится также облако паров щелочного металла натрия, тоже очень большой протяженности — почти в диаметр Юпитера. Сравнительно низко над спутником обнаружены облака нейтральных натрия, калия, кислорода и серы. Структура тора и облаков до конца еще не исследована.

### Европа.

Приливная энергия, рассеиваемая в недрах следующего спутника, Европы, значительно меньше. Первые сообщения после сближения с Юпитером космических аппаратов не

указывали на какие-либо признаки извержений. Но в дальнейшем были опубликованы сведения о наблюдавшемся султоне над лимбом спутника, имеющем в своем составе пары воды, аммиак и «попутные продукты». Тем не менее газовые извержения, столь типичные для Ио, на Европе, по-видимому, очень редки.

То, что предстает на снимках Европы, — это сплошная ледяная оболочка спутника. Вид ее необычен. 100 лет назад была высказана нашедшая идея о каналах на Марсе. Эти линии оказались всего лишь обманом зрения в условиях плохо различимых деталей на другой планете. Но вот на поверхности оранжево-коричневой Европы обнаружена вполне реальная густая сеть искривленных пересекающихся линий. Вид поверхности Европы напоминает снимки Северного ледовитого океана, сделанные с орбиты искусственного спутника Земли. Ученые вначале осторожно отнеслись к напрашивающейся аналогии. Но спектральные измерения не оставляли места для сомнений: природа поверхности — водяной лед и снег.

Крупномасштабные снимки принесли немало загадок. На одном из участков поверхности Европы видно много витков правильной циклоиды с шагом в несколько километров. Происхождение ее остается непонятным.

Размеры и средняя плотность небесного тела позволяют сделать предварительные выводы о доле льда в общей массе спутника. При диаметре 3138 км и средней плотности 3,04 г/см<sup>3</sup> Европа должна быть обогащена водой по сравнению с Ио и Луной. Поэтому первые выводы говорили о толщине ледяной оболочки 100 км. Дальнейшие оценки, однако, привели к более скромным цифрам. В недрах Европы также выделяется энергия приливных взаимодействий, которая как минимум поддерживает в жидком виде толстую мантию, а попросту говоря, глубочайший подледный океан. Благодаря небольшой, но заметной эксцентricности орбиты и гравитационному взаимодействию с другими спутниками рассеиваемая энергия довольно велика, поэтому океан может быть теплым. Глубина океана составляет несколько десятков километров, а ледяной панцирь должен иметь толщину всего несколько километров. Эта оболочка хрупка и под действием перемещающегося приливного выступа иногда лопается, образуя доступ жидкой воды к безатмосферной поверхности спутника.

По-видимому, глобальная сеть линий — это трещины в толстой ледяной коре, вызываемые тектоническими процессами. Эти разломы не сопровождаются какими-либо движениями коры, а сами трещины заполняются быстро затвердевающим оранжевым раствором. Ширина разломов от десятков километров до 100 км, а их протяженность достигает 3000 км и более. Изливающаяся вода мгновенно закипает и одновременно замерзает, а испарившаяся часть выпадает на поверхность в виде снега и инея в радиусе нескольких сотен километров от источника. Само кипение уносит очень много тепла; в условиях Европы слой льда в полметра образуется за несколько минут. Такая схема подтверждается высокой яркостью поверхности (обнаженный свежий иней и лед) и, как уже говорилось, спектральными измерениями, указывающими на водяной лед почти без примесей.

Как и в случае Ио, фундаментальным оказывается вопрос о возрасте поверхности. К сожалению, доступные пока космические снимки Европы имеют плохое разрешение, в основном около 20 км. На них, практически отсутствуют метеоритные кратеры, эти «засечки» возраста. Добавим, что Европа — очень гладкий спутник (иногда говорят, «как бильярдный шар»). Наибольшие перепады высот не превышают 50 м. Все это можно понимать по-разному: либо как очень молодой рельеф, либо как существование какого-то механизма сглаживания рельефа. В пользу второго говорит высокая температура (жидкий океан воды) и способность льда в таких условиях к пластическим перемещениям (ледники).

Чтобы получить более однозначный ответ, была сделана попытка определить, насколько загрязнена снежная поверхность Европы серой. Как уже говорилось, сера выбрасывается с Ио, встраивается в виде ионов в магнитосферу Юпитера и постоянно бомбардирует

поверхность Европы. Плотность этого потока известна, поэтому содержание серы дает оценку возраста. Измерения, выполненные с борта искусственного спутника Земли, дали следующие результаты: серы намного меньше, чем ожидалось, а средняя скорость выпадения осадков на поверхность за счет извержения воды составляет не менее 10 см за 1 млн. лет. Отсюда сразу же следует вывод, что через трещины, не считая испарения льда с поверхности спутника, выбрасывается не менее 100 кг воды в секунду (конечно, для спутника в целом).

Дно подледного океана должно быть сложено из силикатных пород, составляющих основную часть массы спутника. Если в силикатной подводной коре Европы имеются места повышенного тепловыделения (подводные вулканы), в результате термохимического синтеза могут возникать сложные химические соединения. Правда, существование таких очагов сомнительно, так как масса Европы уступает массе спокойной в вулканическом отношении Луны. Но ведь и вулканизм Ио был сюрпризом. Интерес к подледному океану Европы был стимулирован предположением о возможном существовании в нем жизни, пусть в самых простейших формах. По своему объему океан Европы должен быть близок к земному, если его глубина составляет 50—60 км. При ускорении свободного падения на поверхности  $132 \text{ см/с}^2$  давление на его дне такое же, как на 4-километровой глубине земного океана. Известно, что жизнь на Земле появилась именно в океанах, но для океанов Европы имеется труднопреодолимое ограничение: отсутствие источников энергии, каким на Земле является солнечный свет. Жизнь и фотосинтез неразделимы. Правда, есть одно исключение: соединения серы, образующиеся при весьма высоких температурах подводных извержений» используются некоторыми микроорганизмами в хемосинтезе (химическом синтезе под воздействием тепла). Есть и другие, столь же гипотетические идеи; например, поглощение света микроорганизмами в короткий период существования новых трещин в ледяном панцире планеты. Читатель, вероятно, сможет предложить еще какую-нибудь идею. Но вернемся к началу нашего рассказа: существование ледяной оболочки Европы доказано и сомнений не вызывает. Что же касается океана и связанных с ним предположений, то пока это только умозрительные гипотезы.

**Ганимед, Каллисто и другие.** Массы и средние плотности галилеевых спутников приведены в табл. 2. Средние плотности монотонно уменьшаются от Ио к Каллисто, что указывает на увеличение доли льда.

Таблица 2

**Массы и плотности галилеевых спутников**

Параметр	Ио	Европа	Ганимед	Каллисто
Масса, г	$8,92 \times 10^{25}$	$4,87 \times 10^{25}$	$14,90 \times 10^{25}$	$10,75 \times 10^{25}$
Средняя плотность, $\text{г/см}^3$	3,55	3,04	1,93	1,83

Ганимед — самый большой спутник в системе Юпитера и вообще в Солнечной системе. По своему диаметру (5260 км) он даже превосходит Меркурий. Средняя плотность Ганимеда низка, всего  $1,93 \text{ г/см}^3$ . Одно его полушарие — «морское», другое — «материковое», если эти характеристики годятся для ледяных тел. Внешне Ганимед напоминает Луну, но значительно больше нее. Темная древняя поверхность коричневого цвета на самом деле в 4—5 раз светлее темных районов Луны. На ней ярко выделяются светлые молодые ударные кратеры, имеющие отражающую способность (альбедо) до 100%. Они, как правило, окружены столь же светлым ореолом лучей из выброшенного и обнаженного материала.

Две наиболее крупные темные области на поверхности Ганимеда получили имена Галилей и Симон Мариус. (Последний независимо от Галилея открыл четыре крупнейших спутника Юпитера, практически одновременно с Галилеем.)

Возраст поверхности Ганимеда оказался очень большим. Остановимся немного подробнее на методе оценки возраста по количеству метеоритных кратеров на единице поверхности небесного тела. В эпоху формирования планет и спутников процесс метеоритной бомбардировки шел наиболее интенсивно. Пик ее приходится на время 3,9 млрд. лет назад, после чего она быстро пошла на убыль. Количество метеоритных кратеров, которые сохранились до наших дней, зависит от многих факторов, прежде всего от скорости их разрушения. Так, на Земле они сохраняются сравнительно недолго, а на Меркурии, например, имеются кратеры, восходящие к периоду его образования. Удобный объект для таких оценок— Луна, где имеются обширные равнины лавового характера с известным ныне временем образования. Кратеры на них дают сведения и о том, как изменялась плотность метеоритной бомбардировки со временем.

В настоящее время большие кратеры образуются очень редко. Применительно к галилеевым спутникам Ганимеду и Каллисто есть к тому же простой способ отличить молодой кратер от старого: недавно образовавшиеся имеют в основном светлые дно и лучи вокруг кратера, обнажающие чистую ледяную поверхность. Для определения возраста необходимо знать также, каковы характеристики тел, образующих метеориты, и их количество в данном районе Солнечной системы.

Основным источником метеоритных соударений являются астероиды и кометы (или их обломки). В результате очень редких столкновений астероидов образуется некоторое количество обломков разных размеров. Мелкие, естественно, встречаются чаще; их называют метеороидами. Микрометеороиды легко регистрируются на космических аппаратах. Предполагается, что по их количеству можно судить и о существовании более крупных метеороидов.

Кажется очевидным, что их концентрация должна быть высокой в поясе астероидов и уменьшаться по мере удаления от него в обе стороны. Чтобы оценить реальное распределение метеороидов в пространстве и создаваемую ими опасность для космических средств, на одном из первых дальних космических аппаратов, «Пионер-Сатурн», имелся датчик, который регистрировал удары микрометеороидов. Сведения о числе таких соударений аппарат транслировал на Землю.

На первой ветви трассы от Земли до Юпитера все шло, как и ожидалось: по мере приближения к поясу астероидов частота соударений возросла в 5—6 раз. Удивительно, однако, что частота соударений продолжала увеличиваться и после прохождения пояса астероидов, вплоть до самого Юпитера. Здесь аппарат круто повернул и стал подниматься над плоскостью эклиптики. Частота соударений продолжала расти. Дальнейшее движение к Сатурну сопровождалось неуклонным ростом частоты соударений, вплоть до самой планеты, где она оказалась в 30 раз выше, чем вблизи Земли.

Как понять эти странные результаты? Во-первых, можно предположить, что второй пояс астероидов действительно существует и микрометеороиды приходят оттуда. Во-вторых, что орбиты микроскопических небесных тел образуют что-то вроде «клубка» орбит комет, а афелий их почему-то находится за орбитой Сатурна. Наконец, хорошо бы иметь подробный ряд независимых измерений, чтобы подтвердить постоянство зависимости, полученной космическим аппаратом «Пионер-Сатурн».

Здесь же для нас существенно другое: что интенсивность метеоритной бомбардировки в разных частях Солнечной системы могла подчиняться различным закономерностям и что оценка возраста поверхности небесных тел по количеству ударных кратеров дает не совсем однозначные результаты. С другой стороны, насыщенный кратерный рельеф, как материка Луны или поверхность Каллисто, никак не мог образоваться в сравнительно недавние времена.

Исходя из количества метеоритных кратеров, возраст наиболее старых участков поверхности Ганимеда оценивается в 3—3,5 млрд. лет. Очень большие размеры и сравнительно невысокая средняя плотность, лишь вдвое большая плотности воды, указывают на значительную толщину ледяной коры этого небесного тела. Согласно

расчетам, на водяной лед приходится около 50% его массы. На снимках Ганимеда, выполненных с высоким разрешением, хорошо видны странные изломанные, ни на что не похожие ряды многочисленных субпараллельных долин и хребтов, образующих причудливую структуру на поверхности спутника (снимок внизу на последней странице обложки). Их природа остается пока загадочной.

Эти образования концентрируются главным образом в светлых областях. Ширина их от нескольких километров до десятков километров, а высота хребтов (или глубина долин) составляет всего несколько сотен метров; они простираются на многие тысячи километров, пересекаясь и изменяя иногда направление в точках пересечений и даже пересекая ударные кратеры. В районах этих полос меньше ударных кратеров, что указывает на более молодой их возраст. Высказано предположение, что полосы возникли под действием растяжений ледяной коры Ганимеда, что можно понять как ее локальную тектонику. Более того, подробный анализ указывает на древние явления, напоминающие глобальную тектонику плит на Земле, например, вращение больших блоков поверхности. Наряду со светлыми системами лучей у некоторых кратеров на Ганимеде имеются темные лучи. Возможно, они образовались из темного материала поверхности. В темных же районах в южном полушарии обнаружены необычные кратеры-фантомы, которые выделяются только оттенком, но не имеют выраженного рельефа. Наряду с ними имеется относительно «свежий» метеоритный кратер диаметром 175 км, окруженный сильно разрушенным рельефом. Последний образовался, по-видимому, уже при разрушении застывшей на большую глубину коры.

Оттенки поверхности Ганимеда и следующего спутника — Каллисто — связаны с цветом выпадавших на их поверхность ледяных и силикатных обломков в эпоху последних стадий образования планет и спутников. Природа же гигантских «морей» на поверхности Ганимеда может иметь и другое происхождение. Исследование поверхности этих тел позволяет сделать еще одно удивительное заключение: по-видимому, на ранних стадиях своей эволюции планеты-гиганты излучали в космос огромные потоки энергии. Спутники Юпитера, расположенные несравненно ближе к центральной планете, чем к Солнцу, на единицу площади получали больше энергии, чем Меркурий от Солнца. Следы этих событий и сейчас можно увидеть на поверхности Ганимеда.

Расчеты подтверждают такую возможность. До 10% полной солнечной радиации — такова мощность, которую Юпитер мог излучать в космос на ранней стадии своей эволюции. В лучах Юпитера плавилась льды на поверхности спутников, частично включая Ганимед. Вместе с тем излучавшиеся Юпитером потоки тепла были недостаточны, чтобы вызвать плавление поверхности Каллисто, удаленного от планеты почти на 2 млн. км. Его поверхность представляет собой насыщенный метеоритными кратерами рельеф, сохранившийся со времени образования этих спутников, с возрастом около 3,5 млрд. лет.

На ней запечатлелись следы колоссального столкновения с относительно большим телом: трещины вокруг одного из метеоритных кратеров образуют более десяти концентрических колец диаметром до 2600 км. Образование получило название Валгалла. Его масштабы напоминают гигантский бассейн Моря Зноя на Меркурии. Два мира — мир глубокого холода Каллисто и раскаленный Меркурий — роднят одинаковые по происхождению и сходные по масштабам и очертаниям кольцевые структуры на Каллисто и валы Моря Зноя на Меркурии. Интересно, что центральный кратер Валгаллы невелик и выражен очень слабо.

По своим размерам Каллисто (4800 км) очень немного уступает Ганимеду; средняя его плотность  $1,83 \text{ г/см}^3$ . Водяной лед составляет 60% массы спутника. Ледяная кора Каллисто имеет очень большую толщину.

На Каллисто полностью отсутствуют протяженные равнины, покрытые продуктами извержений (как «морские» области Ганимеда или Луны). Кратеры Каллисто отличаются от кратеров тел силикатной природы (как наша Луна) небольшой глубиной и слабо



выраженными валами. Предполагается, что пластичность ледяной коры за очень большое время сглаживает рельеф ударных кратеров. Температура поверхности Каллисто, (на экваторе в полдень) достигает 140—150 К и быстро падает после захода Солнца. Любопытный факт установлен в радиоастрономических наблюдениях галилеевых спутников: радиояркость (определенная с помощью радиосредств) температура составила 180 К для Каллисто и 165 К для Ганимеда. Причина расхождений с вполне надежными инфракрасными определениями, приведенными раньше, остается неизвестной.

На рис. 4 показана предполагаемая схема внутреннего строения галилеевых спутников. Под тонкой корой Ио находится разогретая и, вероятно, размягченная силикатная мантия. Не исключено, что спутник имеет очень маленькое ядро из более тяжелых каменных пород и льдов, не превышающее 2—3% его массы. Поверхность покрыта отложениями серы, сернистого газа (в виде инея) и другими составляющими. Толщина отложений может достигать 20 км.

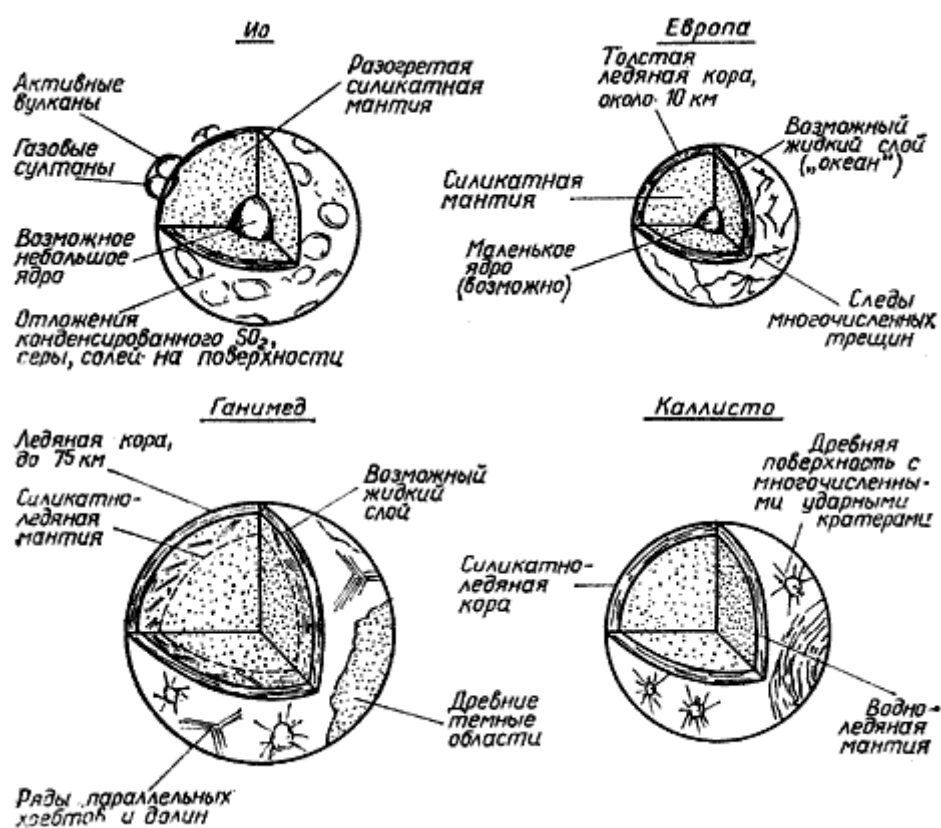


Рис. 4. Внутреннее строение спутников Юпитера

Внешняя оболочка Европы — водно-ледяная. Толщина покрова из льда—около 10 км, глубина океана— около 50 км. Силикатная мантия может быть нагретой, но далеко не до температур плавления. Если там и есть ядро из более тяжелых пород, его масса не может быть более 1—3% массы спутника.

Слой ледяной коры у Ганимеда и Каллисто должен быть толщиной около 75 км, причем в случае Каллисто должна быть значительная примесь каменных пород. Мантия силикатного состава доходит до центра спутников. Поверхность обоих тел покрыта бесчисленным количеством ударных кратеров, большинство из которых очень старые. Более молодые кратеры в некоторых точках обнажают незагрязненную ледяную поверхность.

Проблемы спутников Юпитера, этой «минипланетной системы» в планетной системе, на редкость увлекательны. Здесь можно проследить многие закономерности, присущие

Солнечной системе в целом, хотя есть и существенные отличия. Эта отрасль астрономии ныне быстро развивается.

Ио, Европа, Ганимед и Каллисто легко различаются с Земли даже в бинокль. Но поверхность этих спутников на снимках космических аппаратов ученые увидели впервые. Можно также представить себе вид Юпитера с галилеевых спутников, который должен выглядеть необычайно величественно. Например, с Ио Юпитер виден диском, по диаметру в 36 раз большим привычной нам Луны. Остается добавить, что необычность оттенков и их сочетаний эмоционально производит впечатление незнакомой и привлекательной красоты далеких миров.

Впрочем, возможно, что широко публиковавшиеся цветные фотографии семейства Юпитера имеют преувеличенно яркие тона. Точно так же, как насыщенность цвета экрана телевизора регулируется по желанию телезрителя, переданные из космоса снимки допускают произвольное усиление цветных оттенков изображения. В одной из недавно опубликованных работ известный специалист-планетолог провел сравнение реальных телевизионных сюжетов и опубликованных в печати материалов. По его данным, истинный цвет Ио — бледно-желтый и серый, а Патера Локи имеет светло-соломенный оттенок. Равным образом и другие объекты стали гораздо бледнее.

Два ближайших к Юпитеру спутника, небольшие тела Метис и Адрастея, имеют неправильную форму. Их орбиты проходят по внешнему краю удивительного образования — кольца Юпитера. По-видимому, они играют важную роль в формировании его внешней границы.

Третий спутник, Амальтея, также неправильной формы, имеет размеры 135x85x75 км, причем его большая ось, как и у других близких спутников, постоянно направлена на центр Юпитера. Окраска Амальтеи — оранжевая, альbedo около 0,05. Подробных снимков Амальтеи пока нет. На ее поверхности видно какое-то белое образование. В одной из работ, посвященных происхождению галилеевых спутников, указывается, что в отдаленном прошлом диаметр Ио, вероятно, был намного больше нынешнего, так как спутник постоянно теряет массу в извержениях. Более того, высказывается также предположение, что существовал еще один гигантский спутник, процесс разрушения и потеря массы которого происходили особенно быстро. То немногое, что осталось от него, — нынешняя Амальтея.

Еще один небольшой спутник, Теба, размерами около 50 км, движется по орбите, лежащей между орбитами Ио и Амальтеи.

Вторая группа спутников находится значительно дальше от Юпитера, чем галилеевы спутники, на расстоянии около 12 млн. км. Период их обращения близок к 250 сут. В эту группу входят 5 спутников. Все они очень малы и, кроме особенностей движения и названий, о них мало что известно. Наконец, есть третья группа из четырех спутников, отличающихся обратным направлением движения. Их расстояние от Юпитера около 23 млн. км, а период обращения около двух земных лет.

## **СПУТНИКИ САТУРНА**

Система спутников Сатурна еще более сложна. Общее число их, включая ряд малых спутников, открытых в 1980 г. при пролете возле Сатурна космических аппаратов, составляет 17. Часть наиболее крупных спутников (вместе с планетой) показана на первой странице обложки. В 1980 г. были получены телевизионные снимки всех 17. Крупным планом сняты открытые еще в XVII—XVIII вв. Мимас, Энцелад, Тефия, Диона и Рея. Мельче получились снимки Гипериона и Япета. На снимках обнаружено также несколько совсем маленьких тел, которые зарегистрированы как отдельные точки. В число 17 спутников они не входят.

Название «ледяные» спутники наиболее соответствует спутникам Сатурна. Некоторые из них имеют среднюю плотность  $1,0 \text{ г/см}^3$ , что больше соответствует водяному льду. Плотность других несколько выше, но тоже невелика. Например, Рея, пятый классический спутник Сатурна, имеет плотность  $1,3 \text{ г/см}^3$ . Присутствие большого количества льда в составе спутников Сатурна — это прямое указание на их образование в зоне низких температур, которые и ныне характерны для внешней части Солнечной системы. Согласно существующим теориям в период формирования планет на периферии протопланетного облака температуры были очень низкими, и легкие летучие вещества, такие, как водяной пар, конденсировались преимущественно на периферии. Рассмотрим некоторые особенности системы спутников Сатурна. Их основные небесно-механические данные приводятся в табл. 3, причем названия тех 9 из них (классических), которые были известны в докосмическую эпоху, подчеркнуты.

Таблица 3

### Спутники Сатурна

Название или обозначение	Радиус орбиты, тыс. км	Орбитальн. период, сут	Эксцентриситет орбиты	Наклон. орбиты к экватору планеты, град.	Радиус спутника, км.	Год открытия
S XV (Атлас)	137,67	0,602	0,002	0,3	(19x13)	1980
1980 S 27	139,35	0,613	0,004	0	70x50x37	1980
1980 S 26	141,70	0,629	0,004	0,1	59x42x33	1980
Янус	151,47	0,695	0,007	0,1	110x95x80	1966
Эпиметий	151,42	0,694	0,009	0,3	70x57x50	1966
<b>Мимас</b>	158,54	0,942	0,020	1,52	196	1789
<b>Энцелад</b>	238,04	1,370	0,004	0,02	250	1789
<b>Тетфия</b>	294,67	1,888	0	1,86	530	1684
Телесто	294,67	1,888	—	—	(12x11)	1980
Калипсо	294,67	1,888	—	—	15x12x8	1980
<b>Диона</b>	377,42	2,737	0,002	0,02	560	1684
1980 S 6	377,42	2,737	0,005	0,2	(18x15)	1980
<b>Рея</b>	572,04	4,518	0,001	0,35	765	1672
<b>Титан</b>	1221,86	15,945	0,029	0,33	2575	1655
<b>Гиперион</b>	1481,1	21,277	0,104	0,43	175x117x100	1848
<b>Япет</b>	3561,3	79,331	0,028	(7,52)	730	1671
<b>Феба</b>	12954	550,4	0,163	175	110	1898

В течение 1979—1981 гг. открыто 8 новых спутников Сатурна, причем некоторые открыты наземными средствами благодаря прохождению Земли через плоскость колец. Спутники планеты и ее кольца предлагают небесной механике несколько загадок, которые как раз и возникли, когда в период 1979—1980 гг. происходило такое прохождение. Кстати, прохождения повторяются один раз в 14—15 лет. Это редкое явление наблюдалось, например, в 1966 г., а затем в конце 1979 г. и начале 1980 г. Первый раз Земля прошла через плоскость колец 27 октября 1979 г., второй раз—12 марта 1980 г. В этот период кольца были повернуты к Земле ребром и почти не были видны, что астрономы использовали для поисков слабых образований вблизи Сатурна. В 1980 г. впервые удалось наблюдать с Земли кольцо E в виде слабого повышения яркости на расстоянии 80 тыс. км от внешнего края наружного кольца A. Но этим дело не ограничилось. Используя современную астрономическую технику, несколько групп исследователей объявили о новых удивительных открытиях. Например, по орбите Дионы, четвертого крупного спутника, движется еще один спутник. Он находится вблизи лагранжевой точки L 4.

Здесь следует сказать несколько слов о том, что такое «лагранжевы точки». Среди знаменитых задач теоретической астрономии есть такие, решению которых посвятили свою жизнь целые поколения специалистов. Такова знаменитая «задача трех тел», в которой рассматривается динамика трех гравитирующих масс (т. е. взаимно влияющих друг на друга). Задача отличается чрезвычайной сложностью, если рассматривать ее в

общем виде. Но некоторые частные решения были найдены давно. Так, в работах Лагранжа было показано, что если одно из трех тел намного массивнее других, то устойчивой может быть конфигурация, когда два тела меньшей массы находятся на одной и той же орбите, на расстоянии  $60^\circ$  друг от друга, в так называемых точках L 4 и L 5. Возможно даже присутствие на одной и той же орбите трех тел, также разделенных углами по  $60^\circ$ . Такие спутники называются коорбитальными (существуют и другие точки Лагранжа).

Спутник 1980 S 6 находится именно в такой «гравитационной ловушке», двигаясь впереди крупного спутника Диона, примерно в  $72^\circ$ , причем, по некоторым данным, «качается» относительно точки L 4 и даже может приблизиться к Дионе с тыльной стороны, после чего, отставая, расходитя с нею. Как ни странно, позади Дионы, в другой лагранжевой точке, спутника нет.

Все вновь открытые спутники сравнительно малы по-размерам, имеют геометрическое альbedo 0,3—0,5 и неправильную, за одним исключением, форму. Среди них впервые были обнаружены так называемые спутники «пастухи» (иногда их по аналогии с английским термином называют «сторожевыми собаками»). Кольцо A (внешнее из классических) обладает очень резким краем, что трудно объяснить в рамках старых представлений о динамике колец. Кроме того, в нескольких тысячах километров от внешнего края кольца A находится одно из самых удивительных колец Сатурна — кольцо F. Оно очень узкое, причем иногда удается наблюдать его свитым из нескольких колец-«шнуров». Исследование динамики этих колец и близких к ним небольших спутников показало, что именно спутники поддерживают резкую границу колец F и A (а возможно, определяют и другие их особенности). Своим гравитационным воздействием спутники как бы фокусируют движение отдельных частиц в кольцах, не допуская их выпадения из общего ансамбля.

Орбиты малых спутников, обладающих этими особенностями, располагаются следующим образом. У самого внешнего края кольца A, на среднем расстоянии от центра Сатурна 137670 км, находится «пастух» кольца A, 1980 S 28 (Атлас), размерами около 20 км. 1980 S 27 и 1980 S 26 — соответственно внутренний и внешний «пастухи» кольца F с размерами 70x40 и 55x40 км и средним радиусом орбит 139353 и 141700 км. Два коорбитальных спутника, 1980 S 1 и 1980 S 3 (Янус и Эпиметий), немного больше: 110x90 км и 70x55 км. Их орбиты отличаются всего на 50 км: 151422 и 151472 км. На орбите Тефии (294700 км) в лагранжевых точках L 4 и L 5 находятся маленькие тела размером 50—60 км, 1980 S 25 и 1980 S 13 (Калипсо и Телесто), первое из которых, может, имеет более или менее правильную шаровую форму. Наконец, в точке L 4 на орбите Дионы (377500 км) находится такое же маленькое тело — 1980 S 6.

Большое количество спутников малых размеров должно указывать на какие-то специфические условия формирования системы Сатурна. Не исключено, что они образовались в результате разрушения сравнительно крупного небесного тела в результате его столкновения, например, с астероидом или с ядром большой кометы. Заманчиво предположить, что из менее крупных обломков могло образоваться и само кольцо Сатурна.

Перейдем к классическим (крупным) спутникам Сатурна. Все они (кроме Фебы) находятся в синхронном вращении, т. е. постоянно обращены к Сатурну одной стороной. Масса, плотность и отражательные свойства этой группы спутников приведены в табл. 4. Спутники, указанные в таблице, известны давно, но данные о размерах, альbedo и средней плотности либо существенно уточнены, либо установлены впервые.

Таблица 4

#### Классические спутники Сатурна

№ Название	Масса, г	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	Альbedo
1. Мимас	$3,8 \times 10^{22}$	1,2	0,6

2. Энцелад	$7,2 \times 10^{22}$	1,1	1,0
3. Тефия	$6,2 \times 10^{23}$	1,0	0,8
4. Диона	$1,0 \times 10^{24}$	1,4	0,6
5. Рея	$2,4 \times 10^{24}$	1,3	0,6
6. Титан	$1,4 \times 10^{26}$	1,9	—
7. Гиперион		—	0,3
8. Япет	$2,0 \times 10^{24}$	1,2	0,5/0,05
9. Феба		—	0,05

Первый из них (и самый маленький) — Мимас. Обращает на себя внимание относительно большая глубина метеоритных кратеров, которые покрывают всю поверхность Мимаса, подобно Луне или Меркурию. Диаметр Мимаса всего 390 км (примерно 10% диаметра Луны); на его поверхности (как и на поверхности других: исследованных спутников Сатурна) нет образований, подобных вулканическим кратерам Ио. Диаметр наибольшего ударного кратера на Мимасе достигает 130 км, т. е.  $\frac{1}{3}$  диаметра самого спутника. Находится кратер посередине стороны, обращенной к Сатурну. Диаметр только центральной горки этого кратера около 30 км. Мимас обращается вокруг Сатурна на расстоянии 186 тыс. км и завершает один оборот за 0,9 сут. Средняя плотность Мимаса мала — около  $1,2 \text{ г/см}^3$ , что говорит о его ледяном составе с небольшой примесью силикатных материалов.

Один из интереснейших спутников Сатурна — Энцелад. Это круглое тело диаметром 500 км с плотностью  $1,1 \text{ г/см}^3$  и очень светлой поверхностью. Съемка с высоким разрешением показала, что поверхность Энцелада несет следы каких-то потоков глобальной протяженности, которые на своем пути разрушали кратерный рельеф (что указывает на геологическую «молодость» происходивших явлений).

На границе следов одного из потоков видны остатки более старого рельефа, причем от одного из кратеров остались лишь половина вала и центральная горка. Геологи различают на поверхности Энцелада следы не менее 5 этапов его геологической эволюции.

Бескратерные районы датируются возрастом менее 100 млн. лет. Так как это всего 2% продолжительности истории Энцелада, полагают, что его недра активны и сейчас.

Казалось бы, какие реки могут существовать при средней температуре поверхности тела —  $200^\circ \text{C}$ ? Теоретики в качестве возможного источника активности называют приливное рассеяние энергии, вызываемое Дионой и самим Сатурном, но для этого спутник должен был находиться на более вытянутой орбите. Не исключено, что на Энцеладе есть ледяные вулканы, извергающие воду, водные растворы аммиака и, возможно, метан. Разрушение старого рельефа, вероятно, объясняется тем, что теплые потоки вызывали таяние элементов ледяного рельефа.

Тефия — один из самых больших и близких к планете спутников. Его диаметр 1060 км, средняя плотность  $1 \text{ г/см}^3$ . Поверхность спутника очень светлая, альbedo 0,8. Уже после первой съемки сообщалось о гигантской долине, которая вытянута на  $\frac{3}{4}$  окружности спутника. С другой стороны спутника расположен кратер диаметром 400 км, т. е. в 3 раза больший, чем у Мимаса. Поверхность Тефии, подобно другим спутникам Сатурна, усеяна метеоритными кратерами. Специалисты указывают на следы ранней, очень древней активности, когда недра этого ледяного спутника замерзали и расширялись, ломая кору. В этих процессах поверхность Тефии увеличилась примерно на 10%.

Незначительно больше по размерам четвертый спутник — Диона (1120 км), выделенная на первой странице обложки среди других спутников Сатурна. Орбитальный период Дионы около 2,7 сут, расстояние от центра Сатурна 377 тыс. км — как расстояние Луны от Земли. Поверхность Дионы носит следы выброса материала в результате ударов крупных метеоритов — систему лучей, хорошо известную по Луне. Не исключено, что лучи представляют собой отложения водяного инея на поверхности. Диаметр



наибольшего кратера — около 100 км. На поверхности Дионы есть извилистая долина, образованная, вероятно, трещинами в ее коре.

Каким образом удастся легко наблюдать с Земли столь малые тела, как Мимас, который в 10 раз меньше Луны? Ответ прост: у них светлая поверхность. Например, у Дионы отражательные свойства на светлых участках близки к 100%. Именно это свойство спутников Сатурна облегчает их наблюдение наземными средствами.

Плотность Дионы немного выше, чем у Мимаса, и достигает  $1,4 \text{ г/см}^3$ , что указывает опять-таки на ледяной (с примесью силикатов) состав.

◀ Рис. 5. Спутник Сатурна Рея

Пятый спутник Рея внешне очень нам напоминает Меркурий или Луну (рис. 5). Это одна из наиболее крупных лун Сатурна. Ее диаметр 1530 км. Кратеры здесь достигают 300 км в поперечнике. Значительное число кратеров имеет отчетливый центральный пик. Как и у других спутников, поверхность Реи очень светлая; даже самые темные области имеют альбедо, достигающее 50%. Орбитальный период Реи около 4,5 сут, расстояние от центра планеты 527 тыс. км. Средняя плотность Реи несколько ниже, чем у Дионы, —  $1,3 \text{ г/см}^3$ . Интересно, что у спутников Сатурна в целом не отмечается такого четкого убывающего распределения средних плотностей, как у галилеевых спутников Юпитера. Все значения средней плотности лежат в пределах от  $1,0 \text{ г/см}^3$  (Тетия) до  $1,4 \text{ г/см}^3$  (Диона). Лишь у Титана средняя плотность достигает  $1,9 \text{ г/см}^3$ .

Пропустим пока шестой классический спутник, Титан, и познакомимся с Гиперионом. Оказалось, что переменность его блеска, давно известная по наземным наблюдениям, объясняется его необычной формой, несколько напоминающей плоскую головку сыра. Размеры Гипериона превышают прежнюю оценку (310 км) и составляют примерно  $359 \times 230$  км. Поверхность его темная, альбедо всего 0,3; в то время как для Мимаса, Дионы и Реи оно равно 0,6, а для Энцелада 1,0. Поверхность Гипериона носит следы интенсивной метеоритной бомбардировки, причем наибольший кратер по размерам таков же, как и сам спутник. Резко неправильная форма Гипериона может быть связана с разрушением большого родительского тела. Во всяком случае, известно, что несколько меньший Мимас имеет правильную форму шара.

Благодаря возмущениям в движении, вызываемым его соседом — гигантом Титаном, синхронное вращение Гипериона может нарушаться. Приводились данные о периоде вращения Гипериона 21 сут.

История поверхности Япета, 8-го классического спутника (или 16-го спутника, включая остальные), по-видимому, более сложна. Как и ожидалось, альбедо двух... его полушарий, темного переднего по движению и обратного, различается на порядок (соответственно альбедо 0,05 и 0,5). Таким образом, разгадка меняющейся в 10 раз яркости Япета пришла через 310 лет после его открытия. Лучшее разрешение на снимках Япета составляет 4 км. Диаметр Япета 1460 км, средняя плотность  $1,2 \text{ г/см}^3$ . Плотность метеоритных кратеров на нем весьма высока, и в этом отношении Япет напоминает Рею. Некоторые кратеры на светлой стороне, но вблизи границы с темным районом имеют темное, точно окрашенное дно. По спектрофотометрическим свойствам темная поверхность Япета близка к поверхности Фебы и похожа на органические включения в углистых хондритах. По-видимому, природа различий в отражательных свойствах его поверхности как-то связана с движением Япета. Предполагалось, например, что выброс паров воды и последующая конденсация инея проходили на обеих сторонах спутника, но затем взаимодействие с плазмосферой Сатурна постепенно удалило иней с передней его стороны. Но могло быть и наоборот: темная передняя сторона постоянно собирала

заряженные частицы, которые вызывали постепенное потемнение материала. В последнее время стала популярной гипотеза о том, что передняя сторона Япета «загрязнена» пылью, выбрасываемой с Фебы. При соударениях легкие материалы испаряются, а темные тяжелые остаются на поверхности.

Япет имеет круглую форму. Как ни странно, форму правильного шара имеет и «самый маленький из крупных спутников» — Феба, диаметром 220 км. Правильная форма столь малого небесного тела была неожиданностью. Феба — самый удаленный спутник Сатурна (13 млн. км, или в 3,6 раза дальше Япета). Феба во многом не похожа на другие члены семейства Сатурна. Орбита ее сильно наклонена к плоскости экватора Сатурна, причем направление движения по орбите — обратное. Феба — единственный в системе Сатурна несинхронный спутник, период ее вращения 8—9 ч. Ее поверхность намного темнее, чем у других спутников, геометрическое альbedo всего 0,05. Все эти особенности позволяют предположить, что Феба — захваченный Сатурном астероид, путь которого однажды прошел слишком близко от планеты.

**Титан — несбывшиеся надежды.** В своем сближении с Сатурном «Вояджер-1» прошел на расстоянии всего 7000 км от Титана — самого крупного спутника Сатурна.

Исследования Титана ожидалось с большим интересом. Титан считался самым крупным из всех спутников планет. По наземным измерениям его диаметр оценивался в 5800 км, т. е. получалось, что он больше Меркурия и Ганимеда. К тому же это пока единственный из известных спутников в Солнечной системе, на котором твердо установлено присутствие плотной атмосферы. Предполагалось, что атмосфера Титана может обладать сильным парниковым эффектом, благодаря чему условия у поверхности могли бы даже оказаться приемлемыми для существования жизни. После «марсианских» разочарований было много разговоров о возможной жизни на Титане. Увы, Титан тоже не оправдал этих ожиданий. Это один из самых холодных миров в Солнечной системе, который, как это ни парадоксально, обладает большими массами органических веществ в атмосфере и на поверхности.

Космическая съемка показала, что поверхность спутника неразличима сквозь его плотную красно-оранжевую атмосферу. Красно-оранжевый и желто-коричневый цвета преобладают у Юпитера и Сатурна, Титана, Ио, Европы и Амальтеи. Но в последних трех случаях цвет относится не к атмосфере, а к поверхности этих тел. В атмосфере Титана отмечено несколько слоев неплотных облаков, в том числе на очень больших высотах. Слоистость тумана заметна на высоте 200, 375 и даже 500 км над поверхностью. Еще в 1979 г. весьма трудные наземные (а точнее, с самолета — летающей обсерватории) радиометрические измерения в тепловом инфракрасном диапазоне дали для Титана яркостную температуру около 80 К. Если отнести ее к поверхности, получалось, что никакого парникового эффекта в атмосфере Титана нет и даже, наоборот, поверхность холоднее атмосферы.

Так оно и оказалось. Температура верхних слоев атмосферы Титана близка к 150 К, в то время как температура поверхности составляет 94 К. Это температура конденсации азота. В первых сообщениях указывалось, что на поверхности Титана, возможно, существуют «болота из жидкого азота» с островами из замерзшего метана и из силикатов. Это преувеличение, хотя выпадение дождей из жидкого метана здесь вполне возможно. Здесь пора сказать о составе атмосферы Титана. В 1944 г. в его спектре была найдена полоса метана. Спустя 30 лет в атмосфере Титана спектроскопически был обнаружен молекулярный водород, что казалось парадоксальным, так как масса спутника слишком мала, чтобы удерживать такой легкий газ. Далее было высказано предположение, что этот водород — продукт фотолиза (то же, что и фотодиссоциация) метана и аммиака, выделявшихся из недр в течение эволюции атмосферы Титана. Другая составляющая, образующаяся в результате фотолиза аммиака, — азотноводородные соединения — должна была накапливаться в атмосфере. Анализ предсказывал, что если в атмосфере

Титана есть парниковый эффект, в атмосфере должен присутствовать азот. Правда, для этого нужно было намного больше метана, чем показывали данные спектроскопии. Космические аппараты показали, что парникового эффекта нет, но азот в атмосфере присутствует. Более того, его количество оказалось огромным — атмосфера Титана примерно на 85% состоит из азота. Около 12% (может составлять аргон. Менее 3% (возможно, всего 1%) приходится на метан; имеются небольшие количества этана, пропана, ацетилена, этилена, водорода, кислорода и других составляющих. Спектроскопические измерения позволили отождествить по крайней мере 10 органических компонентов в его атмосфере. Количество азота в столбе атмосферы Титана в 15 раз больше, чем у Земли. Однако из-за малого ускорения свободного падения давление у поверхности лежит около 1,6 бар.

На рис. 6 показаны схема строения атмосферы Титана и зависимость температуры в ней от высоты. Не высотах примерно до 15—20 км находятся облака из метана. Выше появляется окрашенная дымка, которая достигает высокой плотности на том уровне, куда еще проникает ультрафиолетовая радиация Солнца. Слои дымки наблюдались на высотах вплоть до нескольких сотен километров. Дымка имеет красно-оранжевый оттенок.

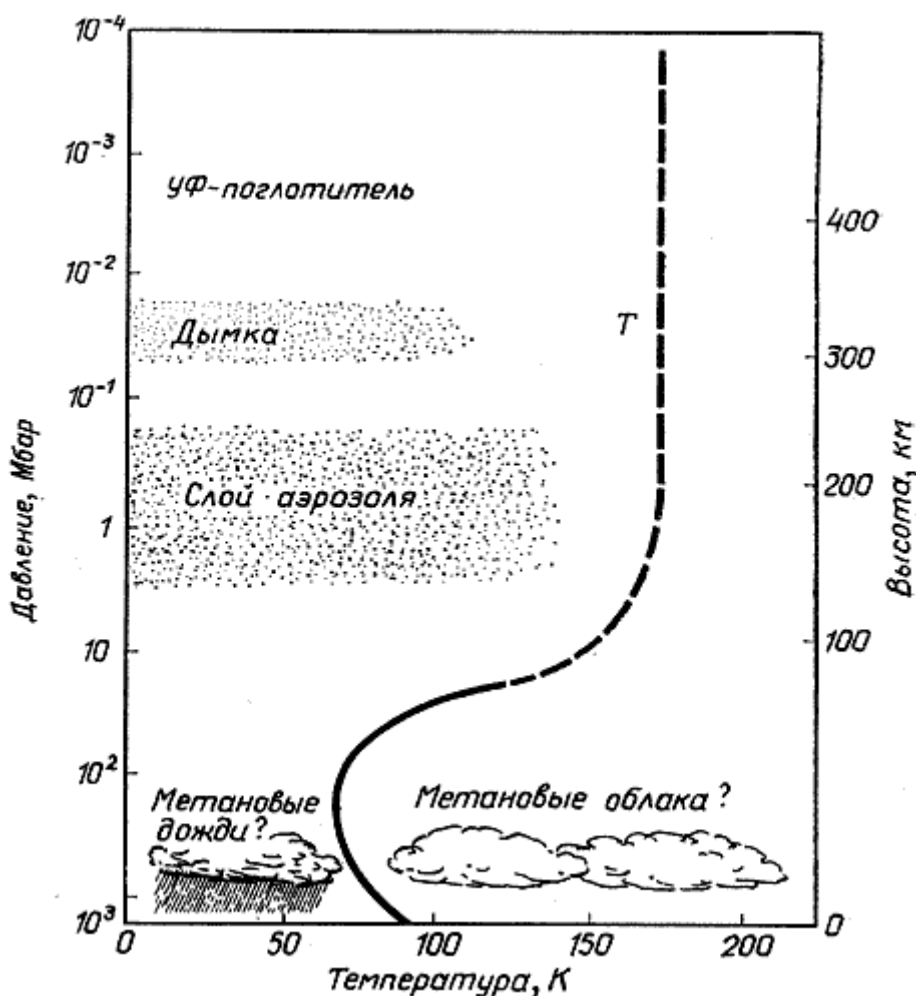


Рис. 6. Строение атмосферы Титана

Состав красно-оранжевого окрашивающего компонента атмосферы оставался неизвестным, но его, кажется, удалось синтезировать. Для этого в экспериментальной установке смесь азота и метана активировали с помощью электрических разрядов, после чего на стенках сосуда появилась красная пленка с такими же отражательными свойствами, как и у атмосферы Титана. Это еще не изученное вещество состоит из



сложной цепи карбонат-гидридов. Оно получило название «солин» (от греческого «грязь»). На Титане оно образуется в результате фотосинтеза.

По-видимому, физические условия у поверхности Титана близки к тройной точке фазового состояния метана; было даже высказано предположение об озерах или морях жидкого метана. Но это предположение встречает много трудностей, хотя и было очень популярным сразу после первых космических исследований Титана. Было «оказано, что сплошной или очень протяженный метановый океан, находящийся в равновесии с насыщенными парами метана в нижней атмосфере, требует, чтобы пары метана составляли до 10%. Но измерения дают значительно меньше.

Недавно выполненные работы показали, что наиболее распространенным углеводородом на Титане должен быть этан ( $C_2H_6$ ), а океан, если он существует, может состоять на 70% из этана, на 25% из метана и растворенного в них азота (около 5%). Глубина такого океана может достигать 1 км, а ниже должен находиться слой жидкого ацетилена глубиной до 300 м. Обилие органических материалов на Титане даже вызвало предположения о возможной промышленной их разработке в будущем. Технология такой промышленности должна обеспечить работу при криогенных температурах. Титан — это мир глубокого холода; по сравнению с ним климат морозных пустынь Марса представляется испепеляющим зноем.

Есть серьезные намерения провести в последние десятилетия XX в. глубокие исследования Титана с помощью специального аппарата, который позволит изучить, в частности, сложные фотохимические процессы в его атмосфере. Проект такого аппарата под названием «Кассини» ныне разрабатывается международным коллективом ученых по инициативе западноевропейских специалистов.

Если учесть большую протяженность атмосферы Титана, он все же не самый большой спутник. Его диаметр по поверхности равен 5150 км. Ганимед больше; именно Ганимед остается самым большим спутником планет Солнечной системы. Состав Титана — льды с примесью силикатных пород, средняя плотность близка к  $1,9 \text{ г/см}^3$ , что опять-таки близко к плотности Ганимеда.

Таким оказалось вблизи удивительное семейство спутников Сатурна, свойства которых астрономы пытались разгадать в течение нескольких столетий.

## ЗАГАДКА СПУТНИКОВ УРАНА

Несмотря на сложность наземных наблюдений таких «слабых» далеких объектов, как спутники Урана, астрономы прошлого открыли практически все крупные спутники этой гигантской планеты. Схема их орбит (без новых спутников, обладающих очень малыми размерами) показана на рис. 7. На схеме отражен наклон орбит спутников к плоскости орбиты Урана, составляющий в среднем  $97,8^\circ$ . Сейчас южный полюс системы направлен примерно на Солнце. Следовательно, северные полушария всех спутников находятся в тени, а в южных наблюдается длительный полярный день, достигающий 42 земных лет.

Группа новых спутников была открыта в 1985—1986 гг. при сближении космического аппарата с Ураном. Их орбиты располагаются внутри орбиты Миранды, вплоть до внешнего края колец Урана, которые также показаны на рис. 7.

Узкие кольца планеты, открытые в 1977 г., пристально изучаются в последние годы. Они оказались очень непохожими на кольца Сатурна, широкие и разделенные узкими «щелями». В случае Урана все наоборот: очень узкие кольца и очень широкие интервалы между ними. Наиболее заметных колец 9, причем самое широкое (несколько десятков километров) — кольцо  $\epsilon$ , имеющее средний радиус 51 150 км. Общей массы материала в

кольцах хватило бы лишь на самый маленький спутник, диаметром 15 км (для колец Сатурна объем материала в 1000 раз больше).

Конечно, кольца Урана представляют очень интересный объект, но здесь мы остановимся только на их связи со спутниками. Спутники 1986 U7 и 1986 U8, небольшие тела размером 15—25 км, открытые в 1986 г. при сближении «Вояджера» с Ураном, оказались такой же группой «сторожевых собак» при кольце  $\epsilon$ , как пара спутников, «стерегущих» кольцо F Сатурна. Таким образом, предположение об их формирующей роли для кольца подтвердилось. Но другие кольца уже, до 300 м, и там спутники не найдены. Что же касается спутников 1986 U7 и 1986 U8, они обращаются в непосредственной близости от кольца с внешней и внутренней сторон. Орбиты всех новых спутников расположены в плоскости экватора Урана.

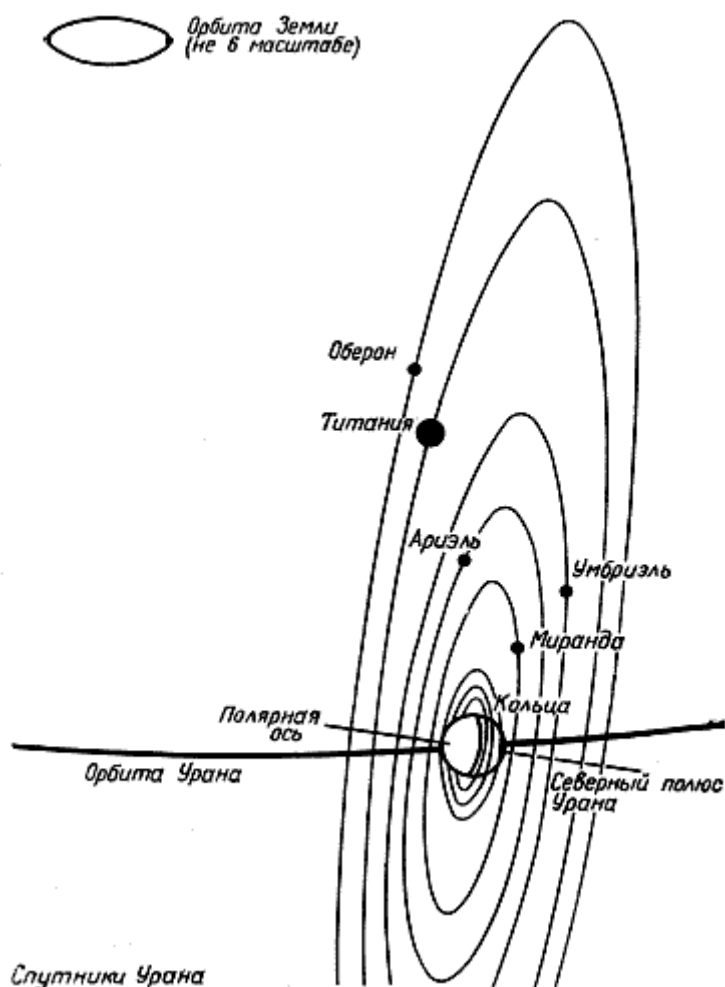


Рис. 7. Спутниковая система Урана

Общее число вновь открытых спутников составило 10. Все они очень малы (не более 40—80 км) и, за одним исключением, обращаются в интервале расстояний от центра Урана от 49 до 80 тыс. км (табл. 5). Это соответствует радиусам орбит от кольца  $\epsilon$  до 0,66 полуоси орбиты спутника Миранда. Наиболее крупный из вновь открытых спутников — 1985 U1. Он обращается на наибольшем расстоянии от Урана (85,6 тыс. км) и был открыт еще задолго до сближения космического аппарата с планетой — в 1985 г. Может быть, его и удалось бы исследовать подробнее, если бы не Миранда, которая отняла основное время телевизионной съемки, и, как увидим ниже, не напрасно.

Таблица 5

## Спутники Урана

Название или обозначение	Радиус орбиты, тыс.км	Орбитальн. период, сут	Эксцентриситет орбиты	Наклон. орбиты к экватору планеты, град.	Диаметр* спутника, км.	Год открытия
1986 U7	49,1	0,33	-	-	15	1986
1986 U8	53,1	0,37	-	-	25	1986
1986 U9	58,8	0,43	-	-	50	1986
1986 U3	61,4	0,46	-	-	80	1986
1986 U6	62,4	0,47	-	-	50	1986
1986 U2	64,1	0,49	-	-	80	1986
1986 U1	65,8	0,51	-	-	95	1986
1986 U4	69,6	0,56	-	-	50	1986
1986 U5	74,7	0,62	-	-	50	1986
1985 U1	85,6	0,76	-	-	160x168	1985
Миранда	128,8	1,41	0,027	4,22	480	1948
Ариэль	190,2	2,52	0,003	0,31	1161	1851
Умбриэль	265,1	4,14	0,005	0,36	1185	1851
Титания	434,0	8,71	0,002	0,14	1586	1787
Оберон	581,9	13,46	0,001	0,10	1546	1787

\* В отличие от табл. 1 и 3 здесь указан диаметр небесного тела.

Новый спутник получил предварительное название «Пук» — имя одного из персонажей комедии У. Шекспира «Сон в летнюю ночь». Выбор названия связан с происхождением имен известных главных спутников. Так, имена «Оберон» и «Титания», которым У. Гершель присвоил двум самым крупным лунам Урана, открытым им в 1787 г. (через 6 лет после открытия Урана) взяты именно из этой комедии. А в 1948 г. Дж.Койпер снова обратился к именам из комедий Шекспира («Укрощение строптивой»), открыв Миранду. Кстати, названия 2-го и 3-го из «старых» спутников (Ариэль и Умбриэль) У.Ласселл в 1851 г. взял из пьесы А. Попа.

Но вернемся к спутнику 1985 U1. По размерам он занимает промежуточное место между классическими и открытыми недавно мелкими спутниками. Было даже предложено отнести его к группе главных. Новый спутник почти такой же черный, как кольца Урана, альbedo которых значительно меньше, чем у сажи, — всего 2—3%. Высказана гипотеза, объясняющая черноту и колец, и ряда спутников (не только малых) наличием на их поверхности конденсатов углеродсодержащих молекул, вероятнее всего метана (который на поверхности спутников пока не найден). Поскольку спутники находятся в относительно плотной плазмосфере Урана, длительная бомбардировка поверхности заряженными частицами приводит к разрушению сорбированных (поглощенных) на ней молекул метана и к высвобождению углерода, придающего поверхности черный цвет. Кстати, ни у одного спутника, ни у колец не найдено каких-либо цветовых оттенков, хотя, как мы видели, поверхность спутников Юпитера и Сатурна слегка красноватая. Ученых удивила форма нового спутника: при диаметре всего 170 км это почти правильная сфера. Вспомним, что большая по размерам (и более плотная) Амальтея обладает неправильной формой. С другой стороны, правильную форму имеет также Феба, небольшой спутник Сатурна, но другой его спутник — Гиперион (меньший, чем 1985 U1) имеет резко неправильные очертания.

Причины таких различий остаются не вполне понятными, хотя существует немало гипотез об ударном разрушении и вторичном объединении образовавшихся осколков. 24 столетия назад Аристотель (а еще ранее Пифагор) учили, что сфера и круг — наиболее совершенные формы, поэтому только сфера может быть формой небесного тела и только она должна заслуживать серьезного внимания. Опираясь на это мнение, не будем сколько-

нибудь подробно рассматривать остальные 9 малых спутников несферической формы. Если же говорить всерьез, из-за малых размеров на их снимках не видно почти никаких подробностей. На «малом большом» спутнике 1985 U1 довольно хорошо различаются крупные кратеры, один из которых по диаметру достигает  $\frac{1}{4}$  диаметра самого спутника.

**Главные спутники.** Перейдем теперь к главным (известным по наземным исследованиям) спутникам Урана. Они расположены в следующем порядке (считая от Урана): Миранда, Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон. Система спутников Урана очень компактная: большая полуось орбиты Оберона 582 тыс. км, а период обращения вокруг планеты — всего 13,5 сут (что объясняется, конечно, большой массой планеты). Миранда находится в 4,5 раза ближе к Урану и завершает один оборот за 1,4 сут.

Основные данные о спутниках планеты были приведены в табл. 5. Все они движутся в радиационных поясах планеты, что приводит к постоянной бомбардировке поверхности спутников заряженными частицами, как уже говорилось выше. Строго говоря, действие радиационных поясов имеет сложный периодический характер, потому что магнитосфера Урана «полощется» относительно плоскости орбит спутников (и плоскости экватора планеты). Ось дипольного поля планеты отклонена от оси ее вращения на  $60^\circ$ , поэтому полярность поля магнитосферы меняется за поворот Урана, т. е. за 8,62 ч. Такое явление пока неизвестно больше ни у одной планеты: у Земли наклон оси диполя к оси вращения  $11,7^\circ$ , у Юпитера  $9,6^\circ$ , у Сатурна  $0^\circ$ . Большой наклон оси дипольного поля для Урана и вызывает периодический характер изменений плотности радиации у поверхности спутников.

Положение полярной оси Урана, которое ныне близко к направлению на Солнце, сделало чрезвычайно сложной программу телевизионной съемки спутников. В самом деле, аппарат шел сквозь плоскость орбит спутников, примерно как стрела сквозь мишень. В случае Юпитера и Сатурна движение было совсем другим: можно было выбрать момент удачного расположения спутников, и тогда аппарат последовательно сближался с многими из этих тел. Схема сближения с системой Урана вызывала еще одну проблему: регистрация последовательных гравитационных возмущений от спутников становилась невозможной, а именно таким методом определялись массы (и средние плотности) спутников Юпитера и Сатурна.

Пришлось воспользоваться методом более сложным: значение масс находились в сравнении с массой Миранды (с которой аппарат сближился наиболее тесно) по взаимным возмущениям спутников с помощью позиционных наблюдений. В табл. 6 приводятся найденные таким образом средние плотности (близкие к  $1,4 \text{ г/см}^3$  что указывает примерно на 60% водяного льда в составе спутников). Таким образом, спутники Урана тоже ледяные, но отличаются от спутников Сатурна несколько большей плотностью. По-видимому, в них содержится довольно много гидратированных силикатов; ядро из них может составлять половину диаметра небесного тела или даже больше.

Таблица 6

#### Главные спутники Урана

Название	Масса (предварительное значение), г	Средняя плотность, $\text{г/см}^3$	Альbedo (предварительное значение)
Миранда	$7,3 \times 10^{22}$	$1,26 \pm 0,39$	0,33
Ариэль	$1,4 \times 10^{24}$	$1,65 \pm 0,30$	0,46
Умбриэль	$1,3 \times 10^{24}$	$1,44 \pm 0,28$	0,18
Титания	$3,3 \times 10^{24}$	$1,59 \pm 0,09$	0,27
Оберон	$2,9 \times 10^{24}$	$1,50 \pm 0,10$	0,24

Оберон оказался первым объектом исследований при выбранной геометрии сближения. Геологи (точнее, астрогеологи; такую специальность породили космические исследования) предсказывал, что будет найдено много метеоритных (ударных) кратеров и почти ничего другого. Действительно, уже на мелкомасштабных телевизионных снимках Оберона угадывались светлые пятна, которые оказались венцами очень светлых лучей вокруг ударных кратеров больших размеров. Природа светлых выбросов — водяной лед, иней, снег. Светлые выбросы контрастируют с очень темной древней поверхностью этого довольно крупного небесного тела. Его диаметр более 1500 км, составляет почти половину поперечника нашей Луны. Поверхность насыщена старыми ударными кратерами, некоторые из которых имеют очень темное дно.

Полной неожиданностью оказалось темное дно и у крупных «молодых» метеоритных кратеров, окруженных светлыми лучами. Это, почти несомненно, указывает на «вулканическую активность» в водяном варианте, когда сквозь образовавшиеся разрывы в ледяной коре на поверхность изливалась загрязненная вода, которая при застывании образовала темную поверхность. Следует помнить, что температура на поверхности спутников Урана очень низкая, средние в течение суток значения составляют от 60 К для Умбриэля до 54 К для Ариэля. При таких температурах физические свойства водяного льда очень отличаются от привычных нам — лед, становится минералом.

Более подробное изучение снимков показало, что через все южное полушарие Оберона проходит широкая долина, свидетельствующая о тектонических процессах ранней геологической истории, спутника. В ряде крупных кратеров видны частично заполнившие их затвердевшие темные потоки. По-видимому, в его истории действовали мощные внутренние силы (и потоки тепла), которые разрушали ледяную кору и вызывали ее движения. Их следы мы видим теперь как разломы поверхности спутника. Но происходило все-это очень давно.

Не следует, однако, считать, что сведения о присутствии воды (в твердой фазе) на поверхности спутников Урана были получены впервые: об этом говорили наземные спектрометрические исследования и раньше.

Титания заметно светлее Оберона и немного больше по размерам, около 1600 км в диаметре. Это самый большой спутник в системе Урана. Снимки Титании, сделанные с высоким разрешением, показали, что древних ударных кратеров здесь значительно меньше, чем на Обероне, причем особенно мало крупных кратеров. Так как они, несомненно, когда-то существовали, действовал какой-то процесс, который привел к их разрушению. Вся поверхность спутника изрезана системой рифтов и пересекающихся извилистых долин, очень похожих на русла рек. Наиболее длинные достигают почти 1000 км в длину. Некоторые из них окружены системами светлых отложений на поверхности. Интересные сведения были получены в поляриметрическом эксперименте: поверхность покрыта слоем пористого материала. Скорее всего, это водяной иней, конденсировавшийся на поверхности после излияний воды в трещинах (вспомним спутник Юпитера Европу).

Наиболее многочисленны мелкие ударные кратеры, которые образовались из остатков протопланетного материала, обломков и других небольших тел, обращавшихся вокруг Урана (не зависящие от него тела образовали бы более крупные кратеры). Что же касается древнего рельефа, то он, по-видимому, был полностью разрушен под действием значительного выделения внутреннего тепла. Этот разогрев происходил опять-таки в раннюю эпоху жизни Титании. В результате разогрева поверхность плавилась, происходила гравитационная дифференциация материалов (более тяжелые породы тонули), что, в свою очередь, приводило к выделению тепла в еще больших масштабах. И уже после застывания вновь образовавшейся поверхности и ее многократных перестроек в процессах тектоники образовались те мелкие кратеры, о которых говорилось выше. Такой процесс глобальной переработки поверхности остается пока недоказанным, но очень вероятным.

Нарастание признаков геологической активности от Оберона к Титании почему-то не находит продолжения на Умбриэле (хотя резко усиливается на Ариэле и Миранде). Поверхность его носит примитивный характер крупных ударных образований с высокой степенью насыщения (многократного наложения кратеров). Умбриэль находится на довольно низкой орбите — всего 265 тыс. км. Умбриэль — очень темное небесное тело. Вокруг его кратеров полностью отсутствуют светлые выбросы. Моноточная, темная поверхность не имеет оттенков, что можно попытаться объяснить именно ее древностью и переработкой под действием заряженных частиц и внедряющихся в поверхность ионов и нейтральных атомов. Но, чтобы еще больше «запутать все дело», найдено несколько крупных кратеров с очень светлым дном. Самый крупный из них находится на экваторе спутника. Как и у Урана, особенность положения оси вращения Умбриэля проявляется в том, что его экватор в наши дни практически постоянно находится на терминаторе спутника (границе дня и ночи).

Отсутствие контрастных образований и очень темная поверхность выделяют Умбриэль среди других спутников Урана. Как это ни парадоксально, именно отсутствие контрастов делает его самым непонятным. Одно из предложенных объяснений заключается в том, что выделение тепла в недрах Умбриэля (в эпоху его образования) почему-то было недостаточным, чтобы вызвать плавление коры и гравитационную дифференциацию. Поэтому смесь льда и темных каменных пород осталась на поверхности в первозданном виде, а выбросы материала вокруг ударных кратеров неотличимы от основной поверхности.

Как же в таком случае объяснить белое дно некоторых (единичных) кратеров? Можно предположить, что темный слой имеет ограниченную толщину, а под ним находится чистый лед. Тогда наиболее крупные тела могли пробить темную корку и обнажить чистые слои. Наконец, толщина темного слоя может быть различной в разных местах. Словом, гипотез немало, как и аргументированных возражений. Вероятно, решение проблемы потребует времени.

Орбита следующего спутника, Ариэля, вдвое ниже, чем орбита Луны, а один оборот он завершает всего за 2,5 сут. Как и другие спутники Урана, он постоянно обращен к планете одной стороной. Диаметр его несколько больше 1 тыс. км. Если геологическая активность Титании не вызывает сомнений, но относится ж далекому прошлому, то Ариэль имеет все признаки сравнительно недавней активности. По-видимому, основной источник его энергии был тот же, что и у Ио: приливное трение, вызванное резонансами с Умбриэлем и Мирандой. Проблема, однако, в том, что сейчас таких резонансов в движении Ариэля нет. Возможно, они были в прошлом. Интересно отметить, что расчеты пока опровергают такую возможность, как, впрочем, отвергает теория и возможность разогрева спутника Сатурна Энцелада, с которым мы познакомились раньше. Что ж, как говорят, тем хуже для теории.

Была получена мозаика Ариэля из четырех снимков с высоким разрешением. И если предварительные телевизионные снимки говорили об активности не меньшей, чем у Титании, то здесь ученые увидели поверхность, сплошь изрезанную рифтами (долинами с обрывистыми краями). Глубина рифтов близка к 10 км, а сами долины достигают нескольких сотен километров в длину. Долины ветвятся, образуя причудливую сеть притоков. Ширина рифтов доходит до 25—30 км. Их гладкое дно несет следы какого-то движения, что еще больше напоминает древние образования такого же вида на Марсе. Наиболее вероятно, что рифтовые долины образовались в эпоху интенсивной перестройки ледяной коры Ариэля, сопровождавшейся ее разломами, сжатием и тектоникой. На поверхности спутника очень мало метеоритных кратеров, что опять-таки указывает на ее молодость, в геологических, конечно, масштабах. Впрочем... высказано даже кажущееся фантастическим предположение о возможной современной активности Ариэля. Но тогда источник его энергии становится совершенно непонятным.

В качестве материала, который мог бы заполнять долины и двигаться вдоль них, предлагается, конечно, лед. Чтобы он был достаточно вязким при столь низких температурах, в нем должны присутствовать какие-то примеси. Предполагается, что это аммиак и метан, которые вместе с водой выделялись на поверхность сквозь разломы. Но так же как и на других спутниках Урана, метан не был обнаружен. Есть и другие предположения о возможной природе этих «ледников неподалеку от абсолютного нуля». Во всяком случае, «водяной вулканизм» на Ариэле сомнений не вызывает.

Поверхность спутника покрыта отложениями очень светлого материала, по-видимому, такого же водяного инея, как на спутнике Юпитера Европе.

**Миранда — сплошные неожиданности.** И все-таки «звездой телеэкрана» оказался не Ариэль. Миранда, спутник диаметром менее 500 км, который, судя по табл. 6 содержит наибольшую долю льда, баллистически стала самой удобной целью телевизионной съемки... И Миранда оправдала все усилия ученых и инженеров, которым пришлось решить массу технических проблем, чтобы обеспечить эту съемку. Во-первых, у Урана довольно темно, в 370 раз темнее чем на Земле. Освещенность «сцены» была примерно такой, как в хорошо освещенной рабочей комнате при искусственном освещении. Любой фотограф знает, что в таких условиях приходится увеличивать экспозицию. То же относится и к телевизионной съемке с космического аппарата.

Однако если другие спутники наблюдались с большого расстояния, когда собственные движения космического аппарата и спутников не мешали длительной экспозиции и особой роли не играли, то в случае Миранды эти движения становились трудной проблемой. Впрочем, даже на снимках Ариэля мелкие детали слегка смазаны. Для Миранды расстояние, с которого производилась съемка, было совсем малым, а требовалось получить ряд снимков с высоким разрешением, чтобы затем составить из них мозаичный «портрет» спутника. Каждая экспозиция достигала нескольких секунд. Словом, чтобы осуществить эту съемку, пришлось полностью изменить обычный порядок работы, когда изображения передавались по радиолинии на Землю сразу после их получения. При съемке Миранды аппарат все время поворачивался, чтобы скомпенсировать размазывание изображений. Но из-за этого его антенна уже не оставалась направленной на Землю, поэтому изображения пришлось записывать на борту, на Землю они были переданы лишь на следующие сутки. Съемкой удалось охватить почти всю освещенную часть спутника, представив ее на восьми снимках с высоким разрешением.

В центре полученного изображения ученые увидели почти правильную трапецию, образованную из темных и светлых полос (см. [последнюю страницу обложки сверху, слева](#)). Трапеция выделяется на фоне окружающей ее поверхности почти полным отсутствием метеоритных кратеров, в то время как окружающий район представляет собой перерезанный небольшими рифтами кратерный рельеф. Трапеция получила условное название «шеvron». Его размеры 140x200 км (на снимках видны детали размерами от 4,6 км и выше). Полосы, образующие шеврон, имеют вид множества параллельных гряд, которые сходятся с другой такой же системой, образуя почти прямой угол. Странное продолжение шеврона — это глубокий, до 20 км, разлом, крутые склоны которого уходят за пределы освещенной части спутника. Шеврон находится у южного полюса Миранды.

Не менее загадочные образования, возможно той же природы, находятся вблизи терминатора; как и у других спутников, из-за положения полярной оси терминатор сейчас постоянно находится в одном и том же географическом поясе Миранды — вблизи ее экватора. Первое из них окантовано такой же системой светлых и темных полос, но более широких, чем у шеврона. Похоже, что отснятая часть этого объекта образует стороны правильного пятиугольника, по площади раз в 5 больше шеврона. Для него, как и для еще одного объекта, о котором речь пойдет ниже, предложено название Цирки Максими,

которое древние римляне понимали как «большой стадион». И действительно, на стадион образование очень похоже, хотя второй из них больше напоминает дорожки ипподрома. И на «стадионе» и на «ипподроме» почти отсутствуют метеоритные кратеры, т. е. это относительно молодые объекты. Второе образование находится с диаметрально противоположной стороны спутника. Оно напоминает очертания «стадиона» и выглядит, словно след пахоты на краю поля. Это примерно 15—20 параллельных торных гряд, разделенных такими же долинами, повторяющимися через каждые 5—7 км. Вся система поворачивает почти под прямым углом и также уходит за терминатор. Этот «ипподром» очень напоминает систему субпараллельных борозд на Ганимеде. По образному выражению одного из геологов, маленькая Миранда предоставила коллекцию всех геологических форм, какие встречаются в Солнечной системе.

Чтобы объяснить природу поверхности Миранды, выдвинуто много гипотез. Одна из них предполагает, что первичное тело было расколото в крупных столкновениях, но части не разошлись, а соединились снова, обнажив внутреннюю структуру небесного тела. Однако остается непонятным, почему сохранились ударные кратеры на остальных частях поверхности спутника. Другая гипотеза допускает, что существовал неравномерный разогрев недр Миранды.

Локальное плавление коры обнажило плиты, обладавшие положительной плавучестью, которые мы теперь видим на поверхности спутника.

Таким образом, спутниковая система Урана оказалась ничуть не менее интересной, чем система Юпитера и Сатурна. Что ждет «Вояджер-2» у Нептуна в 1989 г.?

## СПУТНИКИ НЕПТУНА

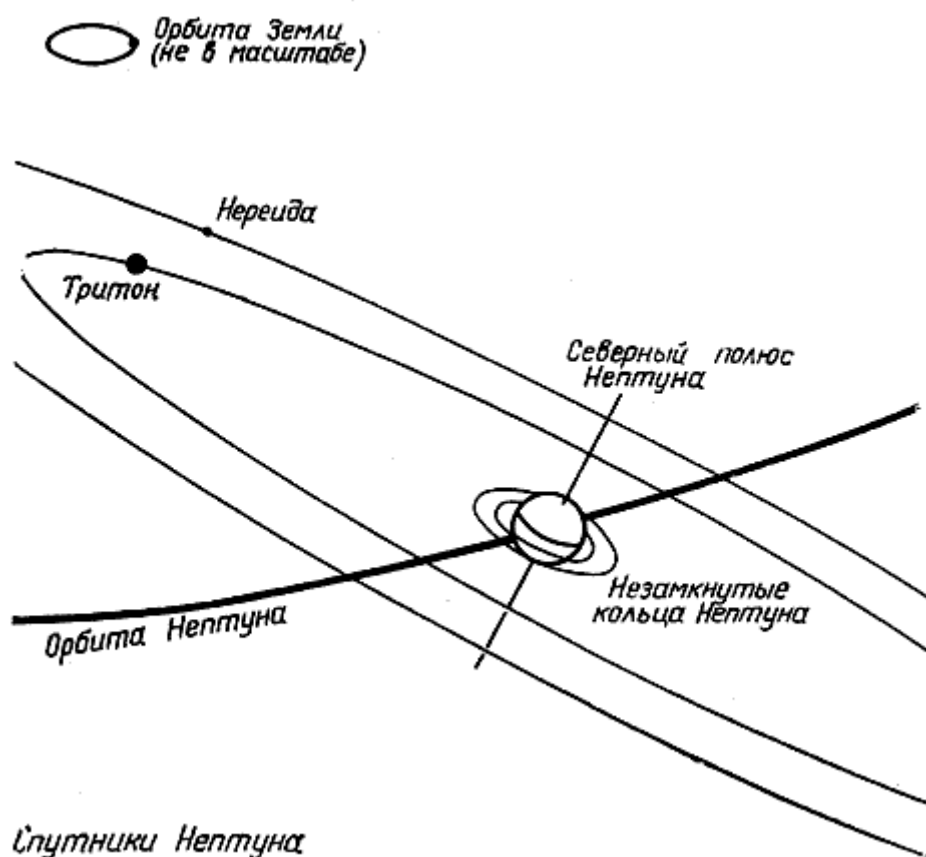


Рис. 8. Схема орбит спутников Нептуна



В отличие от спутников других планет-гигантов, система спутников Нептуна известна только из наземных наблюдений. Пока достоверно известны два члена этого семейства: гигант Тритон и маленькая Нереида. Показать на одной и той же схеме (рис. 8) орбиты обоих спутников невозможно, так как большая полуось орбиты Нереиды составляет 5,5 млн. км, а на один оборот вокруг планеты она затрачивает почти ровно 1 земной год. Нереида — небольшое небесное тело, может быть, всего 100—200 км диаметром, и о ней известно мало.

Тритон — один из самых крупных в Солнечной системе спутников; он входит в группу таких гигантов, как Титан и Ганимед (табл. 7).

Таблица 7

**Спутники Нептуна и система Плутон— Харон**

Название	Радиус орбиты, тыс. км	Орбитальный период, дней	Эксцентриситет	Наклонение орбиты к экватору планеты, град.	Радиус спутника, км	Год открытия
Тритон	355,3	5,877	0,001	159	(1750)	1846
Нереида	5510	360,21	0,75	27,6	(200)	1949
Плутон					<1850	1930
Харон	19,3	6,387			>600	1978

Спутники Нептуна — одна из наименее понятных систем. Некоторые ученые полагают, что ее особенности можно понять как следствие катастрофического воздействия массивного внешнего тела. Был проведен численный эксперимент. Его авторам удалось показать, что воздействие массивного Тела, сблизившегося с Нептуном, действительно, вполне могло перевести один из его спутников на орбиту, не зависимую от орбиты Нептуна. Сторонники «катастрофической» гипотезы подчеркивают также, что Нереида имеет орбиту с фантастическим эксцентриситетом 0,75. (это более подходит для кометы) и что Тритон вращается в обратную сторону, а его орбита сильно наклонена к плоскости экватора Нептуна. Энтузиасты этой гипотезы даже называют вероятный продукт такой катастрофы: потерянный спутник, который известен нам как девятая планета, Плутон, и который, по имеющимся данным, очень похож на Тритон.

Предполагается, что реконструкция первичной орбиты Плутона могла бы даже указать, в какой точке орбиты Нептуна был потерян этот спутник (некоторые данные о Плуtone мы рассмотрим в следующем разделе). Отметим сразу же, что далеко не все специалисты согласны с предложенной гипотезой. Проблематично, например, что пересечение орбит Нептуна и Плутона вообще когда-либо имело место.

Но возможны ли такие катастрофы в поздний период, существования Солнечной системы? Наиболее доказательными были бы экспериментальные наблюдения небесных тел, которые могут вызвать подобные катастрофы. И такие примеры, хотя и в небольших масштабах, действительно существуют. Среди астероидов с необычной орбиты выделяется небесное тело Хирон, который в каталоге астероидов значится под № 2060. Размеры его довольно велики, несколько сотен километров.

В афелии Хирон уходит за орбиту Урана, а в перигелии заходит внутрь орбиты Сатурна. Исследования показали, что в некоторых (очень редких) случаях астероид способен даже проходить сквозь систему спутников Сатурна, что может вызвать значительные изменения орбит небольших небесных тел. Есть предположение, что Хирон — далеко не единственное самостоятельное крупное тело в этой части Солнечной системы: не исключено, что где-то поблизости расположен второй пояс астероидов. Если будут обнаружены такие же объекты в окрестностях Нептуна, «катастрофическая» гипотеза получит дополнительную поддержку. Но вопрос о первичной орбите Плутона еще не решен. Из-за большого эксцентриситета орбиты Плутон сейчас находится ближе к Солнцу, чем Нептун и его спутники. Последний остается внешней планетой на период с

1979 по 1999 г. Начиная с 1930 г. Плутон находится над плоскостью эклиптики (с ее северной стороны), причем сейчас его высота над нею близка к 8 а. е. Ныне возможность его встречи с Нептуном исключена.

Спутник Нептуна Тритон очень необычен. Эксцентриситета орбиты у него практически нет, но вращение вокруг планеты — обратное. Это единственный случай, когда обратное вращение имеет столь крупный (по размерам подобный нашей Луне) и близкий к планете спутник (от Нептуна он отстоит на то же расстояние, что и Луна от Земли). Тритон находится в синхронном вращении (постоянно обращен к Нептуну одной и той же стороной). Передняя по движению сторона спутника примерно на 25% темнее остальной его поверхности (как у некоторых спутников Сатурна).

Особенности в движении Тритона некоторые ученые пытаются увязать с удивительными различиями, обнаруженными в тепловом излучении Нептуна и Урана. Нептун получает от Солнца на единицу поверхности в 900 раз меньше энергии, чем Земля, а всего с учетом большой площади и высокого альбедо — в 100—150 раз. Та же характеристика для Урана выше в 2,4—2,5 раза. Однако обе планеты имеют практически одинаковые эффективные температуры, около 60 К. Уран излучает столько же тепла, сколько получает от Солнца, а Нептун имеет какой-то мощный внутренний источник энергии, который, кстати отметим, вызывает заметные метеорологические явления в его атмосфере. В качестве источника энергии рассматривались, например, постоянное выпадение более тяжелых элементов к центру планеты и фазовые переходы в недрах Нептуна, т. е. тот же источник, который «работает» на Сатурне. Но как объяснить, что этот механизм не действует на Уране, двойнике Нептуна?

Многие авторы склонны искать другой источник энергии, присущий только Нептуну; Им как раз и может быть достаточно большое рассеяние энергии в приливных взаимодействиях Тритона (с его обратным вращением) и Нептуна. Указывается, что эта энергия вполне может объяснять различия между Ураном и Нептуном. Но такого источника надолго не хватит.

По составу Тритон должен относиться к группе ледяных или силикатно-ледяных тел, типичных для планет-гигантов. В его спектре недавно была обнаружена полоса метана. Не исключено, что Тритон, как и Титан, имеет атмосферу. Но по другим оценкам, полоса метана настолько слаба, что может соответствовать только очень разреженной атмосфере, примерно в 25 тыс. раз более разреженной, чем земная. Конечно, атмосфера может включать и другие газы (вспомним Титан). Однако новые измерения показывают, что атмосферы может и не быть: наблюдения в полосах метана 620, 725, 790 и 890 нм не дали положительных результатов. Верхний предел толщины атмосферы, согласно измерениям, не может превосходить 1 м. атм ( $2,7 \times 10^{21}$  молекул метана на  $1 \text{ см}^2$  поверхности).

Вместе с тем обнаружены некоторые признаки полос метанового инея на поверхности, что привело авторов исследований к заключению, что поверхность Тритона состоит из каменных материалов с возможным присутствием незначительных количеств метанового инея, в основном в глубоких тенях. Наконец, недавно было показано, что метановый иней присутствует лишь на одной стороне Тритона.

В этих спектральных исследованиях было сделано еще более интересное открытие. Найдена спектральная полоса у длины волны 2,15 мкм, относящаяся к жидкому азоту! По-видимому, значительная часть поверхности Тритона покрыта неглубоким морем или океаном жидкого азота, по оценкам — всего в несколько метров глубиной. Жидкая поверхность находится где-то неподалеку от южного полюса Тритона, где ныне наблюдается полярный день.

Таким образом, атмосфера Тритона может состоять в основном из азота, а метан образует лишь небольшую примесь к нему. Если размеры и масса Тритона того же порядка, что и у Плутона, гравитационные силы спутника вполне способны удержать такую атмосферу. В последние годы благодаря оснащению наземных обсерваторий новыми физическими приборами вновь стали возможными открытия в телескопических исследованиях далеких

гигантов. Так были открыты и исследованы кольца Урана. Можно ли ожидать сообщений о новых спутниках Нептуна еще до того, как с планетой в 1989 г. сблизится «Вояджер»? Поиски таких спутников очень сложны из-за их отдаленности. Световой поток от тела на орбите Нептуна почти в миллион раз меньше, чем от того же тела на расстоянии Солнце — Земля. И все же задача не совсем безнадежна. За последние годы появилось уже несколько сообщений, что, кроме Нереиды и Тритона, вокруг Нептуна обращаются какие-то тела.

В 1968, 1981, 1983 и 1985 гг. наблюдались покрытия Нептуном звезд, при которых и отмечались интересные явления. Так, 22 июля 1985 г. Нептун прошел близко от звезды АО 186001. На расстоянии примерно двух радиусов планеты свет звезды ослабился на 35%. Явление продолжалось 2 с и было похоже на эффекты, отмеченные в прежних покрытиях. Например, в мае 1981 г. при сближении Нептуна со звездой в созвездии Змееносца, наблюдалось 8-секундное падение блеска звезды. Явление регистрировалось только с одной стороны от планеты, из чего сделан вывод, что причиной уменьшения блеска не может быть кольцо Нептуна, по скорее неизвестный спутник размером около 180 км на орбите с радиусом примерно 50 тыс. км. Можно было предположить, таким образом, что невероятное везение добавило еще два спутника к Нереиде и Тритону. Но дело оказалось сложнее.

Покрытие в 1985 г. наблюдалось из двух точек в Южной Америке, разнесенных на 100 км. Так как его видели обе группы наблюдателей, небесное тело должно быть очень большим, что противоречит 2-секундной длительности явления. Вывод: наблюдались не спутники, а особое незамкнутое кольцо асимметричного типа, Ширина его 10—20 км, расстояние от центра планеты около 76 тыс. км. Кстати, похожее кольцо имеется и в системе Урана. Что же касается положения колец Нептуна, то для них были предсказаны расстояния 35, 58, 96 и 171 тыс. км, которые пока не подтвердились. Но может быть, на этих орбитах все же окажутся спутники? Ждать ответа осталось недолго.

В последние годы активизировалось исследование ледяных спутников далеких планет и Плутона. Несмотря на отмечавшиеся выше скептические нотки, касающиеся общего генезиса Тритона и Плутона, сходство их ныне представляется несомненным, а их различия, по-видимому, объясняются очень существенной ролью Нептуна, влияющего на Тритон. Но прежде чем перейти к Плутону, упомянем о предстоящей судьбе Тритона. Тритон обречен. Потери энергии в приливном взаимодействии с Нептуном не проходят для него бесследно, Тритон по спирали постепенно приближается к Нептуну. По оценкам, через 10—100 млн. лет он войдет внутрь границы Роша, и приливные силы разорвут его на части. Во что превратятся останки Тритона?

## **ПЛУТОН И ХАРОН**



Рис. 9. Изображение Плутона  
(и Харона)

Еще в 50—60-х годах нашего столетия было установлено, что блеск самой далекой и самой маленькой планеты Солнечной системы периодически изменяется. Измерения показали, что период изменений блеска составляет 6 сут 9 ч 17 мин. Такое значение было принято в качестве периода вращения Плутона, но это был не только период вращения самого Плутона. Плутон — слабый объект, но имеется довольно много его «хороших» фотографий, на которых Плутон выглядит бесформенным расплывчатым пятнышком (рис. 9).

Фотографии эти публиковались в научных изданиях лежали в шкафах и на столах ученых. И, как это иногда случается, вместе с фотографиями на столах лежало будущее открытие. Стоило только присмотреться: снимки планеты выглядели слегка вытянутым пятнышком, ориентированным по-разному. К сожалению, до 1978 г.

никто на это не обращал внимания. Никто не предполагал, что за вытянутостью пятна скрывается тесная двойная планета! Оба тела имеют близкие размеры, поэтому правильнее говорить именно о двойной планете или системе из двух спутников, а не о планете и спутнике.

Спутник Плутона, который получил название Харон, так велик и так близок к планете, что в дальнейшем разделить их удалось только методами интерферометрии. Период 6,387 сут оказался периодом взаимного обращения компонентов (или периодом их вращения вокруг общего барицентра — центра масс, см. табл. 7). Исходя из оценок массы планеты, по значению периода удалось найти расстояние между Плутоном и Хароном. В космических масштабах оно оказалось неправдоподобно малым — всего 18—20 тыс. км. На рис. 10 система Плутон—Харон сравнивается с нашей Луной.

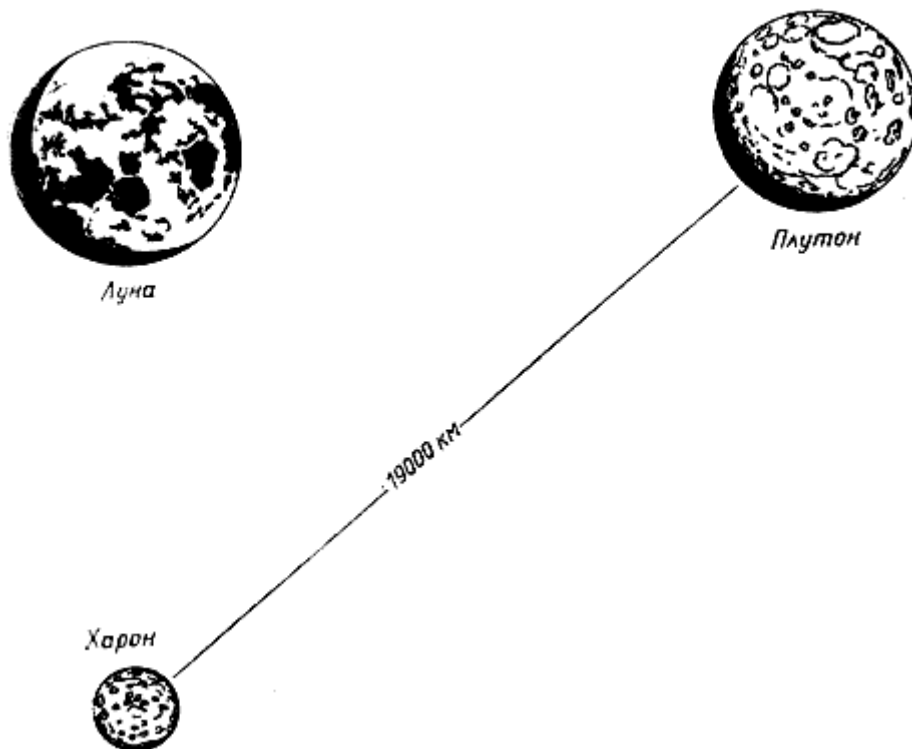


Рис. 10. Плутон и Харон. В том же масштабе размеров и расстояний показана Луна

Плоскость орбиты компонентов расположена так, что сейчас наблюдаются их систематические частичные взаимные затмения. Ожидается, что полная фаза затмений наступит в 1988 г., а затмения продлятся до 1991 г., что позволит уточнить относительные размеры компонентов. Следующий период затмений повторится только через 124 года. Сейчас видимая плоскость орбиты компонентов вытянута почти точно в направлении Север—Юг. Уменьшение блеска при затмениях составляет поочередно 4 и 8%, из чего сделан вывод, что поверхность Харона на 30% темнее, чем у Плутона.

Разумеется, никакими наземными или околоземными средствами различить поверхность системы невозможно, так как диаметр Плутона не превосходит 0,1". Поэтому только тщательная регистрация изменений блеска при взаимных затмениях позволит кое-что узнать о поверхности этих тел. Пока это единственная возможность.

В отличие от спутников Урана, спектрометрические измерения уверенно указывают на присутствие метана на Плуtone. Но в течение нескольких лет продолжается дискуссия: относятся ли наблюдающиеся метановые полосы к атмосфере или к инее на поверхности? Сторонники как той, так и другой гипотез приводят свои доказательства. По-видимому, есть и метановый иней, и очень разреженная атмосфера, плотность которой у поверхности составляет всего 150 миллиардных долей земной. В общем, атмосфера Плутона тонка, но на пределе возможностей современной аппаратуры ее, кажется, удастся обнаружить.

В полученном спектре отражения Плутона имеются полосы у тех же длин волн, которые приводились раньше (620, 790 и 840 нм) и которые совпадают с расчетным спектром поглощения метана. Эти полосы, вероятнее всего, относятся к газовой фазе (атмосфере). Толщина атмосферы Плутона составляет всего 37 м•атм, или  $7,3 \times 10^{22}$  молекул/см<sup>2</sup> (около  $\frac{1}{3}$  содержания углекислого газа в столбе атмосферы Марса). Эта оценка относится только к метану. Не исключено присутствие других компонентов, например инертного газа аргона.

Согласно последним измерениям, атмосфера Плутона может быть более плотной, чем предполагалось, а аргон может быть даже одной из основных ее составляющих.

Что же касается метана, его роль пересматривается. Он может быть значительной, но все же не главной составляющей, как и неон. Вполне возможно, что содержание метана меняется в зависимости от положения Плутона на орбите. Из-за ее огромного эксцентриситета (0,25) солнечная радиация, достигающая Плутона, изменяется на 56% за 248 лет. Перигелий Плутон пройдет в 1989 г. Ожидается, что значительная часть отложений метана на поверхности при этом перейдет в атмосферу и может быть зарегистрирована спектроскопическими методами.

Интересно, что присутствие метана в атмосфере Плутона косвенно позволяет оценить такие параметры планеты, как масса, альbedo поверхности и ее температура. Дело в том, что метан в атмосфере Плутона находится на грани диссипации (удержания атмосферы), если существующие оценки массы компонентов (Плутна и Харона) правильны. Для сохранения атмосферы требуются примерно такие цифры: масса  $2,3 \times 10^{25}$  г ( $\frac{1}{3}$  массы Луны, или в 2 раза больше принятой ныне), радиус 1400 км, средняя температура поверхности не более 52 К (максимальная 62 К). Средняя плотность получается близкой к 2 г/см<sup>3</sup>, что типично для силикатно-ледяных тел вроде Тритона, Титана или Ганимеда.

Интегральное альbedo оценено величиной 0,45, ускорение свободного падения у поверхности 80 см/с<sup>2</sup>. Давление у поверхности мало, для чисто метановой атмосферы оно было бы всего 0,15 мбар.

К нескольким другим, хотя и довольно близким оценкам, привели новые наблюдения Плутона и его единственного спутника Харона на высокогорной обсерватории: Мауна Кеа (Гавайи). Для разрешения (оптического разделения) планеты и спутника использовался новый метод — спекл-интерферометрия. Согласно полученным результатам, сферическое альbedo должно быть около 0,2, значительно меньше приведенной выше величины, а диаметр Харона может достигать 2000 км, или половины диаметра Плутона (для которого эта оценка также несколько увеличивается). Блеск Плутона и Харона в этой тесной

двойной системе в средней оппозиции составляет 15,3 и 16,9 звездной величины. Общая масса около  $3 \times 10^{-3}$  от массы Земли, что близко к величине, указанной выше. Таким образом, после многократных «уценок» массы системы Плутон—Харон наметилась тенденция к ее повышению.

Наконец, приведем самые последние оценки: расстояние между центрами компонентов 19300 км, диаметр Плутона не больше 3700 км, диаметр Харона не менее 1200 км. Полная масса системы  $1,4 \times 10^{25}$  г.

Угол между осью вращения Плутона (или, что то же, системы Плутон—Харон) и плоскостью его орбиты близок к  $50^\circ$ . Это приводит к очень сильным сезонным эффектам на планете, включая полярные ночи с длительностью до 124 лет на полюсах. Кстати, ныне в северном полушарии Плутона осень. Вероятно, смена сезонов на Плутоне должна характеризоваться накоплением конденсатов метана в полярных шапках и увеличением массы атмосферы и ее плотности в период таяния (а точнее, сублимации) полярной шапки. Такой процесс хорошо известен для Марса, где в полярных шапках откладывается конденсированный углекислый газ. Согласно расчетам, уменьшение температуры всего на 2 К приводит к конденсации половины всего метана из атмосферы Плутона.

Еще менее определенные данные касаются физики Харона. И, к сожалению, ждать экспериментальных уточнений придется еще очень долго.

Ранее уже говорилось о том, что имеются достаточные основания сомневаться в статусе Плутона как планеты. Высказывались также предположения, что своим образованием и сама двойная система Плутон—Харон тоже обязана космической катастрофе, хотя многие ученые склонны искать менее экзотические решения. Известно также, что положение Плутона в Солнечной системе противоречит эмпирическому правилу Тициуса—Боде, которое предсказывает для него большую полуось орбиты 77 а. е. (при действительном значении 39,75 а. е.). Правда, для Нептуна также нет хорошего соответствия (30 а. е. вместо предсказываемых 38,7 а. е.), хотя оба расхождения могут иметь одну и ту же причину.

Отметим в заключение, что система Плутона с компонентами, в 20 раз более близкими, чем Земля и Луна, — очень тесная. Это настоящая двойная планета, которая представляет к тому же мир наиболее глубокого холода в Солнечной системе. А с открытием Харона, одного из крупнейших спутников, можно сравнивать только открытие Тритона, состоявшееся в 1846 г.

## НОВОСТИ АСТРОНОМИИ

### ПЕРВАЯ ВСТРЕЧА С УРАНОМ

24 января 1986 г. «Вояджер-2» сблизился с седьмой планетой Солнечной системы — Ураном — и провел запланированную программу исследований планеты, ее спутников и колец, включающую 10 научных экспериментов.

Открытый Гершелем в 1781 г., Уран относится к наиболее далеким планетам. Он удален от нас в среднем в 19,2 раза дальше, чем Солнце. Эксцентриситет его орбиты 0,0472 — почти такой же, как у Юпитера. Несмотря на огромный диаметр, более 50 тысяч км: (экваториальный радиус 25,6 тыс. км), его диск никогда не бывает виден под углом более  $3,9''$  (в среднем  $3,7''$ ). Из-за сильного поглощения в красной части спектра планета имеет сине-зеленый цвет. Поглощение вызывают полосы метана, который в небольшом количестве присутствует в атмосфере. Различить на маленьком диске какие-либо детали очень сложно.

Были попытки связать видимость деталей с очень длительными сезонными изменениями на Уране. Плоскость экватора наклонена к плоскости орбиты планеты на  $97^\circ 55'$ . Такое

положение полярной оси приводит к многим особенностям планеты. Уран вращается, как говорят, «лежа на боку». Наклон считается большим  $90^\circ$ . чтобы направление вращения было таким же, как у других планет (кроме Венеры), — против часовой стрелки. Но тогда соответствующий полюс, который обращен в северную полусферу эклиптики, следует считать южным. Сейчас он обращен к Солнцу (и Земле). Как следствие, в проекции на плоскость эклиптики планета имеет обратное вращение. Плоскость орбиты наклонена к эклиптике всего на  $46'$ .

Положение оси вращения приводит к практически максимально возможным сезонным изменениям освещенности. При орбитальном периоде 84 года полярные день и ночь длятся 14 лет на широте  $30^\circ$ , по 28 лет — на  $60^\circ$  и по 42 года — на полюсах. Однако из сезонных эффектов пока установлена только одна зависимость: радиояркостная температура планеты в целом за 20 лет, с 1965 по 1985 г., возросла со 140 до примерно 290 К. За это время центр видимого с Земли диска Урана сместился от экватора к полюсу. До сближения «Вояджера» с Ураном оставалось неизвестным, как влияет необычное положение полярной оси на циркуляцию его атмосферы. Телевизионные камеры аппарата задолго до сближения стали передавать на Землю одно изображение южной полусферы за другим, но никаких деталей на них не обнаружилось. Ученые из группы изображений тщательно рассматривали снимки ровного голубого шара, более темного к краям. Иногда им казалось, что они видят очень слабые облака, а острословы из группы «Вояджера» предложили переименовать группу изображений в группу воображений.

В январе 1986 г. все же удалось обнаружить 4 небольших голубых облачка на широтах от  $30$  до  $70^\circ$ . Как оказалось, они перемещаются в долготном направлении (восток — запад) и описывают концентрические окружности вокруг полюса. Отсюда сразу же был сделан вывод, что циркуляция атмосферы на Уране определяется силами Кориолиса (инерционной природы), а не притоком солнечной радиации. Так же организована циркуляция и в атмосферах других планет. Найденный по движению облачных образований период вращения атмосферы зависит от широты и составил  $16,2$  ч у  $33^\circ$  ю.ш. и примерно 14 ч у  $70^\circ$  ю.ш.

Атмосфера планеты очень эффективно выравнивает (за счет циркуляции) температуры на всех широтах, в том числе и в темном полушарии. Измерения приходящих от планеты тепловых потоков показали, что на уровне давления 0,6 бар температуры на: экваторе у светлого и темного полюсов одинаковы и составляют 64 К, а в средних широтах градуса на 2 ниже. Минимальные температуры, 5,1 К, наблюдались на уровне 0,1 бар (выше видимой поверхности облаков). Выше температуры снова возрастают, достигая 750 К на высоте до 6000 км над облаками. Указывается, что такие высокие температуры экзосферы, состоящей в основном из водорода, нельзя объяснить только излучением Солнца, которого на весь огромный диск планета получает в 140 раз меньше, чем маленькая Земля. Равенство температур у полюсов и экватора заставляет ученых искать какие-то особые причины, определяющие метеорологию атмосферы Урана. Высказано предположение, что ими могут быть процессы конденсации воды в атмосфере. О составе ее будет сказано ниже; здесь же существенно, что в ней содержится, по-видимому, много паров воды. На Земле конденсация влаги и выпадение осадков мало влияют на среднюю плотность атмосферы, изменяя ее не более чем на 2%. Но для Урана такие изменения могут достигать 50%. Тогда движения в очень плотной атмосфере планеты становятся больше похожи на течения в земных океанах, которые вызываются изменениями солености воды. В средних и высоких широтах атмосфера Урана вращается быстрее, чем глубокие слои планеты. Такое явление хорошо известно по атмосфере Венеры и носит название суперротация. Но относительно чего отсчитывать скорость вращения планеты, где сама атмосфера занимает почти  $\frac{1}{2}$  ее радиуса? Здесь придется обратиться к сведениям о внутреннем строении Урана, где получено много нового.

Масса Урана была найдена методами наземной астрономии (по движению спутников планеты):  $8,67 \times 10^{28}$  г — в 14,5 раза больше массы Земли. Средняя плотность планеты

составляет  $1,27 \text{ г}\cdot\text{см}^3$ . Сведения о внутреннем строении Урана долгое время опирались только на теоретические расчеты и аналогии с Юпитером и Сатурном. Последние, как теперь выяснилось, вели к переоценке содержания гелия.

К ревизии этих представлений привело открытие в 1977 г. (методами наземной астрономии!) темных колец Урана, что имело важные последствия. С тех пор наблюдалось уже 13 покрытий звезд кольцами Урана, благодаря чему удалось установить величину эксцентриситета некоторых колец, а через нее найти постоянную прецессии их обращения вокруг Урана. Прецессия позволила определить сферические гармоники  $J_2$  и  $J_4$  гравитационного поля планеты. Еще один важный параметр — динамическое сжатие планеты  $\alpha$  — был найден по снимкам Урана, сделанным со стратосферного аэростата в 1970 г. Коэффициенты  $J_2=0,0035$  и  $\alpha=0,23$  позволяют определить как распределение масс в недрах планеты, так и скорость ее вращения. Полученный таким образом период вращения составил  $16\pm 1$  ч. Прежде для его определения использовалось движение редко наблюдаемых протяженных светлых деталей. Найденный по ним период заметно изменялся в разные годы. До 1975 г. наиболее надежной считалась величина 10,8 ч. Начиная с 1976 г. разные исследователи получали от 15 до 24 ч, в среднем около 16,3 ч. В 1981 г. были получены значения 16,2—16,4 ч.

Наиболее надежный метод определения периода вращения дают измерения радиоизлучения магнитосферы планеты, выполняемые с космического аппарата. Так удалось найти периоды вращения Юпитера (9 ч 55,5 мин) и Сатурна (10 ч 39,4 мин). Метод, по существу, дает период вращения магнитосферы. Но так как магнитное поле (если оно имеется у планеты) возбуждается глубоко в ее недрах, оно должно вращаться с тем же периодом, что и глубокие слои. Пропустим пока некоторые интересные подробности и приведем окончательный результат: период вращения Урана составил 17 ч 14,4 мин, что довольно близко к приведенным выше цифрам.

По-видимому, Уран имеет довольно большое ядро (около 0,3 радиуса планеты), построенное из тяжелых элементов — металлов и силикатов, а также так называемых льдов. «Льдами» принято называть метан, аммиак и воду — соединения четырех активных элементов, широко распространенных в космосе. Имеется в виду, что на уровне видимого облачного слоя все они превращаются в льды. Ядро окружено толстой оболочкой из водорода и гелия с условной внешней границей около 0,7 радиуса планеты. Атмосфера Урана содержит 12% гелия (как у Юпитера), остальное — главным образом водород. Судя по спектрам, заметной составляющей атмосферы Урана должен быть метан, до 3%. Но проблема метана довольно сложна. Прежде всего отражательные свойства Урана даже в наиболее глубоких полосах поглощения метана, например у 890 нм (где планета должна быть совсем черной), остаются на уровне нескольких процентов. Это указывает, скорее всего, на присутствие тумана — аэрозолей, что, с одной стороны, увеличивает путь светового луча и увеличивает кажущееся содержание метана, с другой — усиливает отражение света в полосах поглощения метана. Сама дымка, вероятно, состоит из мелких кристалликов замерзшего метана. С учетом всех этих сложностей содержание метана в газообразной фазе может быть значительно меньшим, на уровне десятых долей процента. В атмосфере обнаружены также некоторые малые составляющие, в том числе ацетилен, образующийся при фотолизе метана. Вместе с тем в спектрах Урана не наблюдаются полосы аммиака, которым богата атмосфера Юпитера, и снова причина этого в низкой температуре видимых слоев атмосферы, где аммиак выморожен. Но он может находиться в глубине атмосферы. Интересно, однако, что в спектрах теплового радиоизлучения, исходящего именно из глубоких слоев атмосферы, полоса поглощения молекул  $\text{NH}_3$  вблизи длины волны 2 см довольно слабая. Не исключено, что аммиака в атмосфере Урана действительно намного меньше, чем на Юпитере и Сатурне. Среди других углеводородов предполагалось присутствие этана, имеющего характерную полосу 12,2 мкм. Пока в излучении Урана она не найдена, хотя наблюдается в тепловом излучении Нептуна.



Тепловое излучение Урана выделяет его из ряда других планет-гигантов. Тепло из их горячих недр постепенно проникает сквозь атмосферу и излучается в космос. Измерения показывают, что тепловой поток от планет-гигантов в 2—2,5 раза больше получаемого от Солнца за одним исключением: Уран отдает лишь чуть больше, чем получает. Еще недавно предполагалось, что тепло излучается за счет небольшого, на миллиметры в год, сжатия гигантов. Но причина оказалась сложнее. Наиболее вероятно, что в результате фазовых переходов водорода, находящегося в условиях колоссальных давлений, гелий становится нерастворимым в водороде и, как более тяжелый элемент, выпадает к центру планеты, что освобождает значительную энергию. Для Урана и Нептуна возможны и другие механизмы выделения тепла. Оказалось, однако, что при близком сходстве Урана и Нептуна существует какая-то причина, по которой на Нептуне этот механизм действует, а на Уране — нет.

Магнитное поле Урана, его напряженность и структура относились к главным исследованиям «Вояджера». Но прежде чем это поле было обнаружено, ученым пришлось немало поволноваться. Некоторые наземные наблюдения можно было истолковать как косвенные указания на существование поля. Но «Вояджер» подходил все ближе к Урану, а никаких признаков поля не было. Лишь за 5 дней до сближения удалось принять характерные всплески радиоизлучения, вызываемые взаимодействием магнитного поля с потоком заряженных частиц. По периодичности этих всплесков и был найден период вращения планеты.

Магнитное поле обладает определенным давлением. Там, где оно уравнивается газодинамическим давлением солнечного ветра, возникает так называемая ударная волна. «Вояджер» безрезультатно прошел все предсказанные положения ударной волны а только за 10 ч до наибольшего сближения, 24 января 1986 г., пересек ее. Дальнейшие двое суток аппарат провел внутри магнитосферы Урана, которая оказалась необычайно сложной. Она простирается на 0,6 млн. км и заполнена плазмой, образующей радиационные пояса, похожие на земные. На уровне видимой облачной поверхности (где давление около 0,5 бар) напряженность дипольного поля близка к земной: 0,23 Э. Ось магнитного диполя на 60° наклонена к оси вращения и на 8000 км смещена от оси вращения к ночному (северному) полюсу. Положение полюсов диполя обратно земному, как у Юпитера и Сатурна. Комбинация сильного наклона диполя к оси вращения и наклона последней к орбите приводит к тому, что магнитосферный хвост Урана вращается в пространстве, подобно штопору.

Наглядную модель поля Урана можно представить, если вставить в мячик под углом 60° к горизонтали стержневой магнит и вращать мячик вокруг горизонтальной оси. С каждым оборотом направление поля в «магнитосфере» будет меняться дважды. При прочих равных условиях трехслойная модель («каменное» ядро из металлов, окислов металлов и силикатов, глубочайший жидкий океан и газовая атмосфера). Такая модель была разработана на основе уже упоминавшихся коэффициентов  $J_n$ , а и периода вращения дает большее отношение экваториального диаметра к полярному, чем модель без океана.

Данные «Вояджера» показали, что строение планеты, где над «каменным» ядром простирается плотная атмосфера из перемешанных легких газов и «льдов», дает более близкие к наблюдениям результаты. В верхней, подоблачной, части такой атмосферы может содержаться очень значительное количество воды и пара без всяких океанов.

Многочисленные новости о спутниках Урана изложены в основной части брошюры. Здесь отметим лишь, что наблюдения спутников представляли нелегкую задачу еще и потому, что солнечная освещенность вблизи Урана в 370 раз слабее, чем вблизи Земли.

«Особенно это ощущалось при телевизионной съемке темных объектов, таких, как кольца Урана.

Кольца были открыты недавно, в 1977 г., с самолетной астрономической обсерватории при наблюдении покрытия Ураном звезды. Кольца находятся близко к планете, в пределах 25,5 тыс. км над облачным слоем. У планеты оказалось 9 чрезвычайно узких,

сравнительно плотных колец и ряд диффузных образований той же природы. Кольца темнее, чем сажа; наблюдать их с Земли можно только при использовании специальной методики и весьма чувствительных новых физических приборов. Вся группа занимает интервал высот всего 9,3 тыс. км. Самое широкое — внешнее асимметричное кольцо  $\epsilon$  шириной 32 км, самое узкое — третье снаружи кольцо  $\gamma$  шириной 600 м. Порядок колец следующий:  $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ , 4, 5, 6. В отличие от колец Сатурна и особенно Юпитера кольца Урана почти не содержат пылевых частиц. Это глыбовые кольца с размерами отдельных элементов в несколько метров. Когда «Вояджер» скрывался за планетой, радиолуч обоих передатчиков последовательно просветил все кольца. Крупные размеры элементов были подтверждены, куски в 10 см встречаются редко. Темный цвет их поверхности, по-видимому, определяется их положением в поясах заряженных частиц и постоянной бомбардировкой последними.

Кольца Урана вызывают у астрономов-планетчиков большой интерес. Как сказал один французский астроном, кольца подобны запаху духов: малые количества вещества создают сильные эмоции. Если же говорить всерьез, кольца действительно ставят много проблем. Например, установлено, что частицы колец, даже обращающиеся на одинаковом среднем расстоянии от планеты, из-за возмущений приобретают небольшую относительную скорость и иногда сталкиваются между собой, что рано или поздно приводит к их разрушению. Косвенно это подтверждает слабое, вероятно, остаточное кольцо Юпитера. Но есть, кажется, даже историческое свидетельство разрушения колец. У. Гершель вел дневник наблюдений. 16 марта 1789 г., спустя ровно 8 лет после открытия Урана, Гершель изобразил Уран с кольцами и приписал: «Кольцо короткое, не такое, как у Сатурна». Специалисты считают эту запись ошибкой: увидеть кольцо в его нынешнем виде Гершель не мог. Но вот что удивляет: кольцо у него показано в том ракурсе и на том месте, где оно и находилось в 1789 г. Не значит ли это, что кольцо обветшало всего за 200 лет?

**Ксанфомалити Л. В.**

**К 86** Спутники внешних планет и Плутон. — М.: Знание, 1987. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 6).  
11 к.

В брошюре рассказывается о спутниках планет-гигантов и о системе Плутон — Харон. Многие из приводимых здесь сведений получены с помощью космических аппаратов лишь недавно.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

**1705050000**

**ББК 22.654**

© Издательство «Знание», 1987 г.

---

Научно-популярное издание

**Леонид Васильевич Ксанфомалити**

**СПУТНИКИ ВНЕШНИХ ПЛАНЕТ И ПЛУТОН**

Гл.-отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*. Редактор *Е. Ю. Ермаков*.  
Мл. редактор *Е. Е. Куликова*. Обложка художника *А. А. Астрецова*.  
Худож. редактор *Т. С. Егорова*. Техн. редактор *Н. В. Калюжная*.  
Корректор *В. И. Гуляева*.

**ИБ № 8834**

Сдано в набор 18.03.87. Подписано к печати 15.05.87. Т-00518. Формат бумаги 84×108<sup>1/32</sup>. Бумага газетная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,79. Тираж 31 947 экз. Заказ 690. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 874206.  
Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.