

ИГОРЬ АФАНАСЬЕВ, ДМИТРИЙ ВОРОНЦОВ

# Межпланетная эквистрика



Со времен Кеплера и Ньютона астрономам известно, что в поле тяготения массивного центрального тела движение происходит по классическим траекториям — эллипсам, параболам и гиперболам. Однако современные космические трассы часто сильно отличаются от классических. И порой только благодаря изощренной фантазии навигаторов удается найти нестандартные решения, позволяющие осуществить, казалось бы, невыполнимые космические проекты.

В начале XX века, когда принципиальная выполнимость космических полетов была научно обоснована, появились первые соображения об их возможных траекториях. Прямолинейный полет от Земли к другой планете энергетически крайне невыгоден. В 1925 году немецкий инженер Вальтер Гоман (Walter Hohmann) показал, что минимальные затраты энергии на перелет между двумя круговыми орбитами обеспечиваются, когда траектория представляет собой «половинку» эллипса, касающегося исходной и конечной орбит. При этом двигатель космического аппарата должен выдать всего два импульса: в перигее и апогее (если речь идет об околоземном пространстве) переходного эллипса. Данная схема широко используется, например, при выведении на геостационарную орбиту. В межпланетных полетах задача несколько усложняется необходимостью учитывать притяжение Земли и планеты назначения соответственно на начальном и конечном участках траектории. Тем не менее полеты к Венере и Марсу выполняются по орбитам, близким к гомановским.

#### БИЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ТРАЕКТОРИИ

Пожалуй, первым примером более сложного космонавигационного приема могут служить биэллиптические траектории. Как доказал один из первых теоретиков космонавтики Ари Абрамович Штернфельд, они оптимальны для перевода спутника между круговыми орбитами с разным наклоном. Изменение плоскости орбиты — одна из самых дорогих операций в космонавтике. Например, для поворота на 60 градусов аппарату надо добавить такую же скорость, с какой он уже движется по орбите. Однако можно поступить иначе: сначала выдать разгонный импульс, с помощью которого аппарат перейдет на сильно вытянутую орбиту с высоким апогеем. В ее верхней точке скорость будет совсем невелика, и направление движения меняется ценой относительно небольших затрат топлива. Одновременно можно скорректировать и высоту перигея, немного изменив скорость по величине. Наконец, в нижней точке вытянутого эллипса дается тормозной импульс, который переводит аппарат на новую круговую орбиту.

Этот маневр, называемый «межорбитальным перелетом с высоким апогеем», особенно актуален при запуске геостационарных спутников, которые первоначально выводятся на низкую орбиту с наклоном к экватору, равным широте космодрома, а потом переводятся на геостационарную орбиту (с нулевым наклоном). Использование биэллиптической траектории позволяет заметно сэкономить на топливе. ►



«Вояджер-2» стартовал раньше «Вояджера-1» и летел медленнее, но благодаря гравитационным маневрам он за 10 лет посетил все планеты-гиганты Солнечной системы

NASA

### ГРАВИТАЦИОННЫЕ МАНЕВРЫ

Многие межпланетные миссии при современных технических возможностях просто неосуществимы без обращения к экзотическим навигационным приемам. Дело в том, что скорость истечения рабочего тела из химических ракетных двигателей составляет около 3 км/с. При этом по формуле Циолковского каждые 3 км/с дополнительного разгона втрое увеличивают стартовую массу космической системы. Чтобы с низкой околоземной орбиты (скорость 8 км/с) отправиться к Марсу по гомановской траектории, надо набрать около 3,5 км/с, к Юпитеру — 6 км/с, к Плутону — 8—9 км/с. Получается, что полезная нагрузка при полете к дальним планетам составляет лишь несколько процентов от выведенной на орбиту массы, а та, в свою очередь, лишь несколько процентов стартовой массы ракеты. Вот почему 700-килограммовые «Вояджеры» (Voyager) запускались к Юпитеру 600-тонной ракетой «Титан» (Titan IIIE). А если ставится цель выйти на орбиту вокруг планеты, то возникает необходимость брать с собой запас топлива для торможения, и стартовая масса возрастает еще больше.

Но баллистики не сдаются — для экономии топлива они приспособили ту самую гравитацию, на преодоление которой при старте уходит значительная часть энергии. Гравитационные, или на профессиональном языке пертурбационные маневры практически не требуют расхода топлива. Все что нужно — это наличие вблизи трассы полета небесного тела, обладающего достаточно сильной гравитацией и подходящим для целей миссии положением. Подлетая к небесному телу, космический аппарат под действием его поля тяготения ускоряется или замедляется.

Здесь внимательный читатель может заметить, что аппарат, ускорившись гравитацией планеты, ею же и

тормозится после сближения с небесным телом и что в результате никакого ускорения не будет. Действительно, скорость относительно планеты, используемой в качестве «гравитационной пращи», не изменится по модулю. Но она поменяет направление! А в гелиоцентрической (связанной с Солнцем) системе отсчета окажется, что скорость меняется не только по направлению, но и по величине, поскольку складывается из скорости аппарата относительно планеты и, по крайней мере частично, скорости самой планеты относительно Солнца. Таким способом можно без затрат топлива изменить кинетическую энергию межпланетной станции. При полетах к дальним, внешним, планетам Солнечной системы гравитационный маневр используется для разгона, а при миссиях к внутренним планетам — напротив, для гашения гелиоцентрической скорости.

Впервые идею гравитационного маневра высказали Фридрих Артурович Цандер и Юрий Васильевич Кондратюк еще в 1920—1930-х годах. Официально считается, что впервые подобный маневр выполнила в 1974 году американская станция «Маринер-10» (Mariner 10), которая, пролетев вблизи Венеры, направилась к Меркурию. Впрочем, первенство американцев оспаривают отечественные историки космонавтики, считающие первым гравитационным маневром облет Луны, который в 1959 году осуществила советская станция «Луна-3», впервые сфотографировавшая обратную сторону нашего естественного спутника.

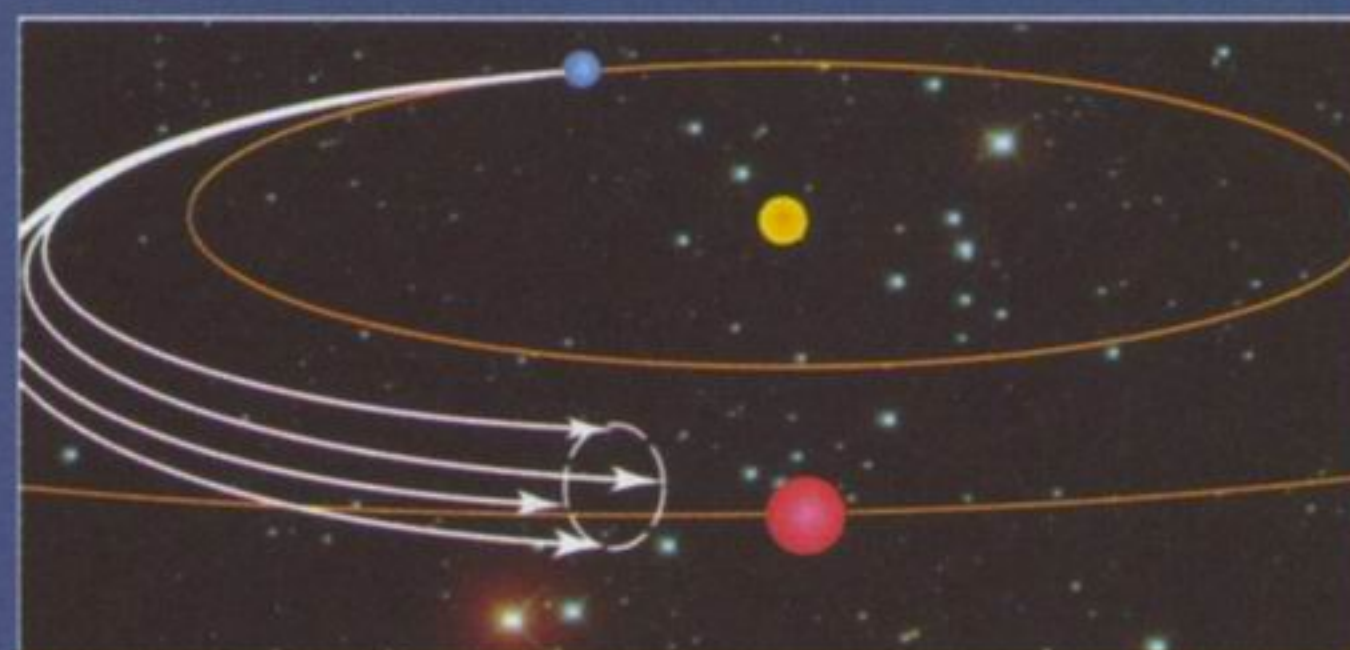
### ЮПИТЕР НАМ ПОМОЖЕТ

Многие межпланетные зонды использовали для разгона тяготение Юпитера. Первыми были аппараты «Пионер-10» и «Пионер-11» (Pioneer), а вслед за ними «Вояджер-1» и «Вояджер-2».

### ВОЗМУЩЕНИЯ И КОРРЕКЦИИ

На картинках траектории межпланетных полетов выглядят очень просто: от Земли станция движется по дуге эллипса, дальний конец которой упирается в планету. Эллиптичность орбиты вокруг Солнца диктуется первым законом Кеплера. Рассчитать ее по силам даже школьнику, но если по ней запустить реальный космический аппарат, он промахнется мимо цели на многие тысячи километров. Дело в том, что на движение аппарата помимо Солнца влияет тяготение окружающих вокруг него планет.

Поэтому точно рассчитать, где окажется аппарат спустя месяцы, а то и годы полета, можно только сложным численным моделированием. Задаются начальное положение и скорость аппарата, определяется, как относительно него расположены планеты и какие силы действуют с их стороны. По ним рассчитывается, где окажется аппарат спустя небольшое время, скажем, спустя час, и как изменится его скорость. Затем цикл вычислений повторяется, и так шаг за шагом просчитывается вся



Расходящийся конус траекторий — следствие погрешностей выведения космического аппарата

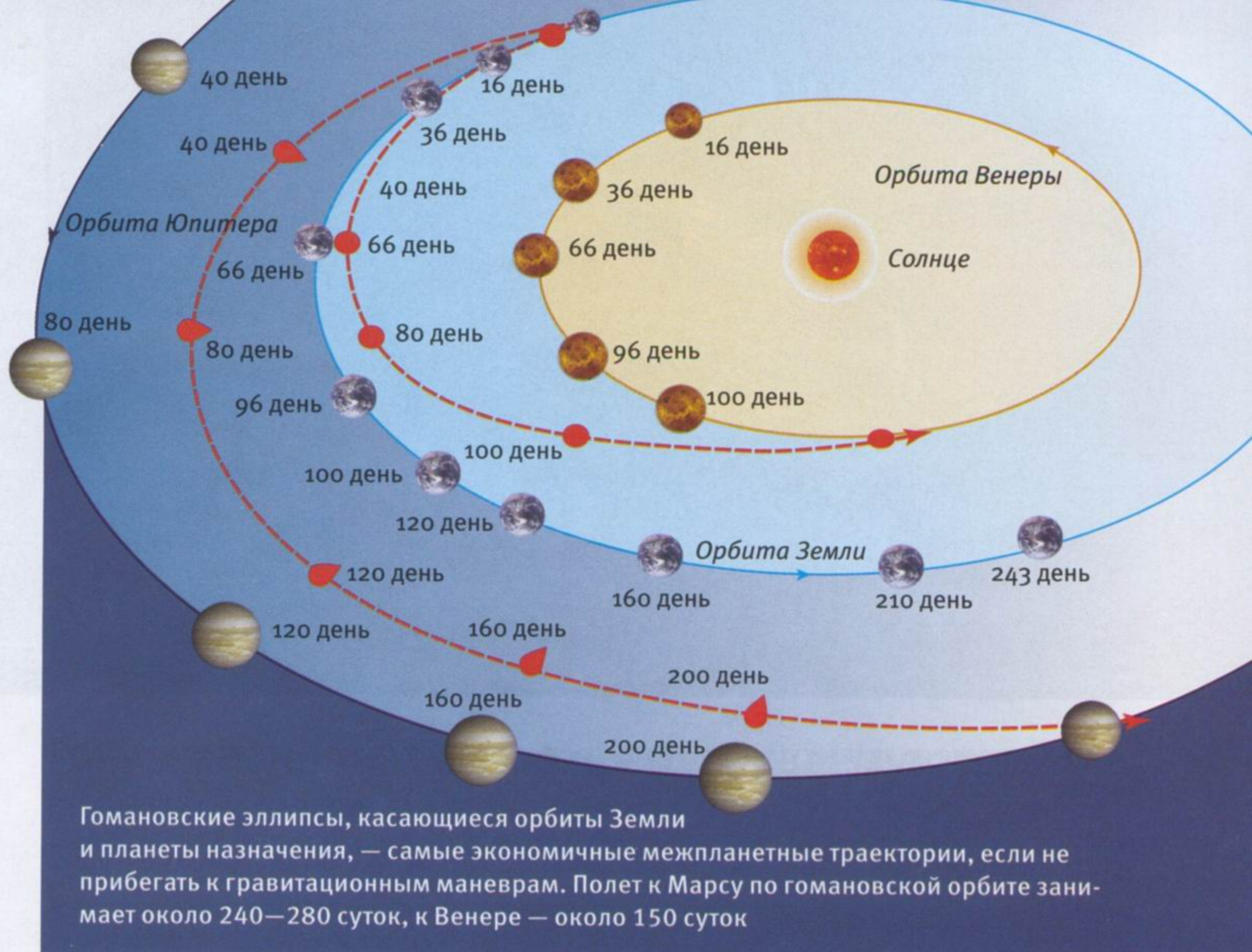


Последствия ошибки при гравитационном маневре

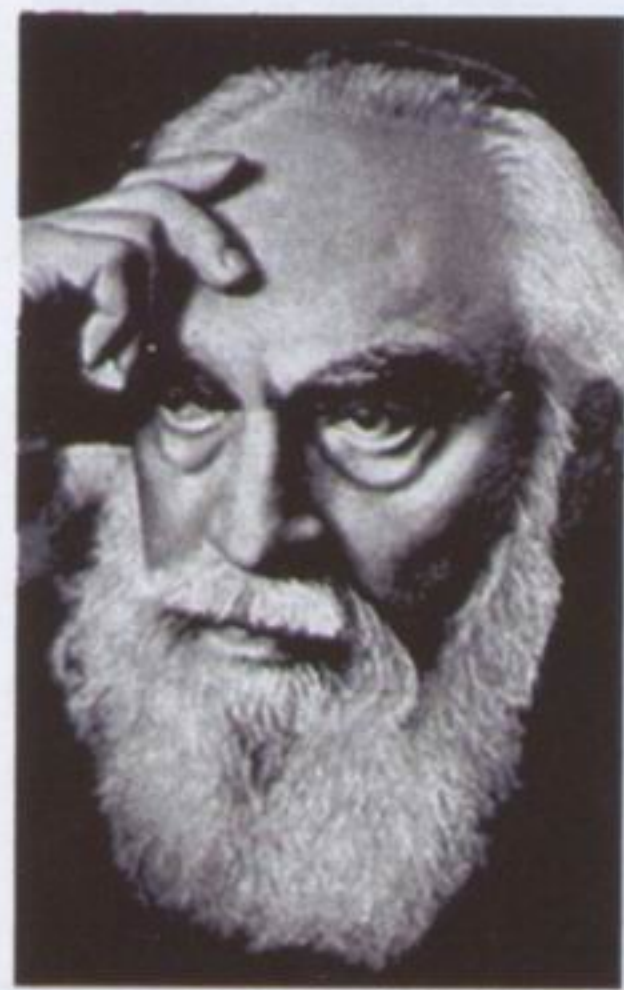
В 1992 году Юпитер помог выйти из плоскости эклиптики «Улиссе» (Ulysses) — зонду, исследующему полярные области Солнца, вокруг которого он обращается по орбите, почти перпендикулярной земной. Другим способом вывести аппарат на такую орбиту при современном уровне развития космической техники просто невозможно. Выполнил пертурбационный маневр у Юпитера и зонд «Новые горизонты» (New Horizons), запущенный Соединенными Штатами к Плутону 19 января 2006 года. Увеличив скорость на 4 км/с и на 2,5 градуса отклонившись от плоскости эклиптики, он сможет прибыть к цели в 2015 году, прежде чем на Плутоне (который в этом столетии удаляется от Солнца) станет замерзать атмосфера, снижая тем самым ценность будущих исследований.

Разумеется, для выполнения гравитационных маневров дата старта должна быть выдержана весьма точно. Баллистики оперируют понятием «окно запуска» — это интервал дат, в пределах которого эффективность запланированных гравитационных маневров максимальна. Ближе к краям «окна» эффект становится меньше, а потребности в топливе — больше. Если же выйти за его границы, то носитель просто не сможет вывести аппарат на нужную орбиту, что приведет к срыву полета или недопустимому возрастанию его длительности. Например, запуск «Новых горизонтов» неоднократно переносился по погодным и техническим причинам. Задержись старт еще на несколько дней, и зонд отправился бы в полет уже без расчета на «гравитационную помощь» Юпитера и с меньшими шансами на успех.

Выполнять маневры у планет-гигантов удобнее всего. Благодаря их большой массе поворачивать возле них можно по широкой плавной дуге ▶



## АВТОР «СКАФАНДРА» И «КОСМОНАВТИКИ»



Ари Абрамович Штернфельд (1905—1980) — один из пионеров космонавтики. Родился в Польше в еврейской семье. Высшее образование получил во Франции. Увлёкся идеей космических полетов, выучил русский язык, чтобы читать работы Циолковского и переписываться с ним. Готовил в Сорбонне докторскую диссертацию по теме расчета космических орбит, однако ученый совет в 1934 году отверг ее как фантастическую. Угроза фашизма и коммунистические симпатии склонили его к эмиграции в СССР, где он стал работать в Реактивном научно-исследовательском институте вместе с Королевым и Глушко. В конце 1930-х руководство института было арестовано, а Штернфельд уволен. Он никогда больше не работал в области ракетной техники, но читал лекции и писал научные, научно-популярные и научно-фантастические книги. Его политические убеждения резко изменились, и после войны он безуспешно пытался вернуться в Польшу. К французским работам Штернфельда восходят такие термины советской ракетно-космической техники, как «космонавт», «космодром», «космонавтика», «перегрузка», «скафандр». На основе его расчетов строились траектории первых советских и американских межпланетных станций.

**Окном запуска называют интервал дат, в пределах которого эффективность запланированных гравитационных маневров максимальна**

траектория. Скорее всего, она попадет не совсем туда, куда нужно. Тогда начальные условия немного меняют и повторяют расчет, пока не будет получен требуемый результат. Но как бы тщательно ни была рассчитана траектория, ракета не сможет идеально точно вывести на нее аппарат. Поэтому с самого начала рассчитывается целый пучок слегка расходящихся траекторий — изогнутый конус, внутри которого аппарат должен оказаться после старта. Например, при полете к Венере отклонение начальной

скорости от расчетной всего на 1 м/с обернется у цели промахом в 10 000 километров — больше размера планеты. Поэтому уже во время полета параметры движения аппарата уточняются по телеметрическим данным (скорость, например, до миллиметров в секунду), а затем в расчетный момент включаются двигатели и орбиты корректируются. Коррективы тоже не бесконечно точны, после каждой из них аппарат попадает в новый конус траекторий, но они не так сильно расходятся у точки

назначения, поскольку часть пути уже пройдена. Если у цели аппарату предстоит гравитационный маневр, это повышает требования к точности навигации. Например, при пролете в 10 000 километрах от той же Венеры ошибка в навигации на 1000 километров приведет к тому, что после маневра станция сойдет с курса примерно на градус. Исправить такое отклонение корректирующим двигателям, скорее всего, окажется не под силу. Еще жестче требования к точности навигации при

использовании аэродинамического торможения в атмосфере. Ширина коридора составляет всего 10–20 километров. Пройди аппарат ниже — и он сгорит в атмосфере, а выше — ее сопротивления не хватит, чтобы погасить межпланетную скорость до орбитальной. К тому же расчет таких маневров зависит от состояния атмосферы, на которую влияет солнечная активность. Недостаточное понимание физики инопланетной атмосферы тоже может оказаться фатальным для космического аппарата.

Александр Сергеев



«Улисс» с разгонным блоком был выведен в космос шаттлом «Дискавери». Юпитер помог ему выйти на полярную гелиоцентрическую орбиту

NASA

Венеры и один у самого Меркурия, а между ними производились маневры двигателями, чтобы каждый раз правильно входить в гравитационную «воронку» планеты. «Мессенджеру» предстоит совершить еще пять маневров (два гравитационных и три — двигателями), прежде чем он станет спутником ближайшей к Солнцу планеты. За это время он «намотает» вокруг Солнца 8 миллиардов километров — больше, чем до Плутона! Однако, не будь траектория столь сложной, при современном состоянии ракетно-космической техники этот полет вообще не мог бы состояться.

и требования к точности навигации остаются довольно мягкими. Однако нередко в качестве «пращи» используют Венеру, Землю, Марс и даже Луну. Тут уже ошибаться нельзя, в противном случае аппарат уйдет от планеты совсем не в том направлении, как было запланировано.

**КОСМИЧЕСКИЙ ГРАВСЕРФИНГ**

Наиболее сложны — но тем и интересны! — траектории с пертурбационными маневрами не у одного, а у нескольких небесных тел. К примеру, станция «Галилео» (Galileo), чтобы добраться до Юпитера, осуществила гравитационный маневр в поле тяготения Венеры, а потом еще два возле Земли. Такие полеты возможны не всегда, а лишь при определенном расположении планет. Самый знаменитый подобный «большой тур» совершил «Вояджер-2», который

последовательно пролетел вблизи Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Его близнец «Вояджер-1» тоже мог бы пройти подобным маршрутом, однако ученые предпочли поближе рассмотреть загадочный спутник Сатурна Титан, и его тяготение необратимо отклонило траекторию станции от направления на Уран. Это было трудное, но верное решение. Именно данные «Вояджера-2» позволили спустя 24 года осуществить посадку на Титан зонда «Гюйгенс» (Huygens).

В наши дни еще более сложный полет выполняет станция «Мессенджер» (MESSENGER). Ее основная задача — выход на орбиту вокруг Меркурия для детального изучения его характеристик. Миссия, рассчитанная на семь лет пути, в январе 2008 года вышла на заключительный этап. Аппарат уже выполнил четыре гравитационных маневра: один около Земли, два возле

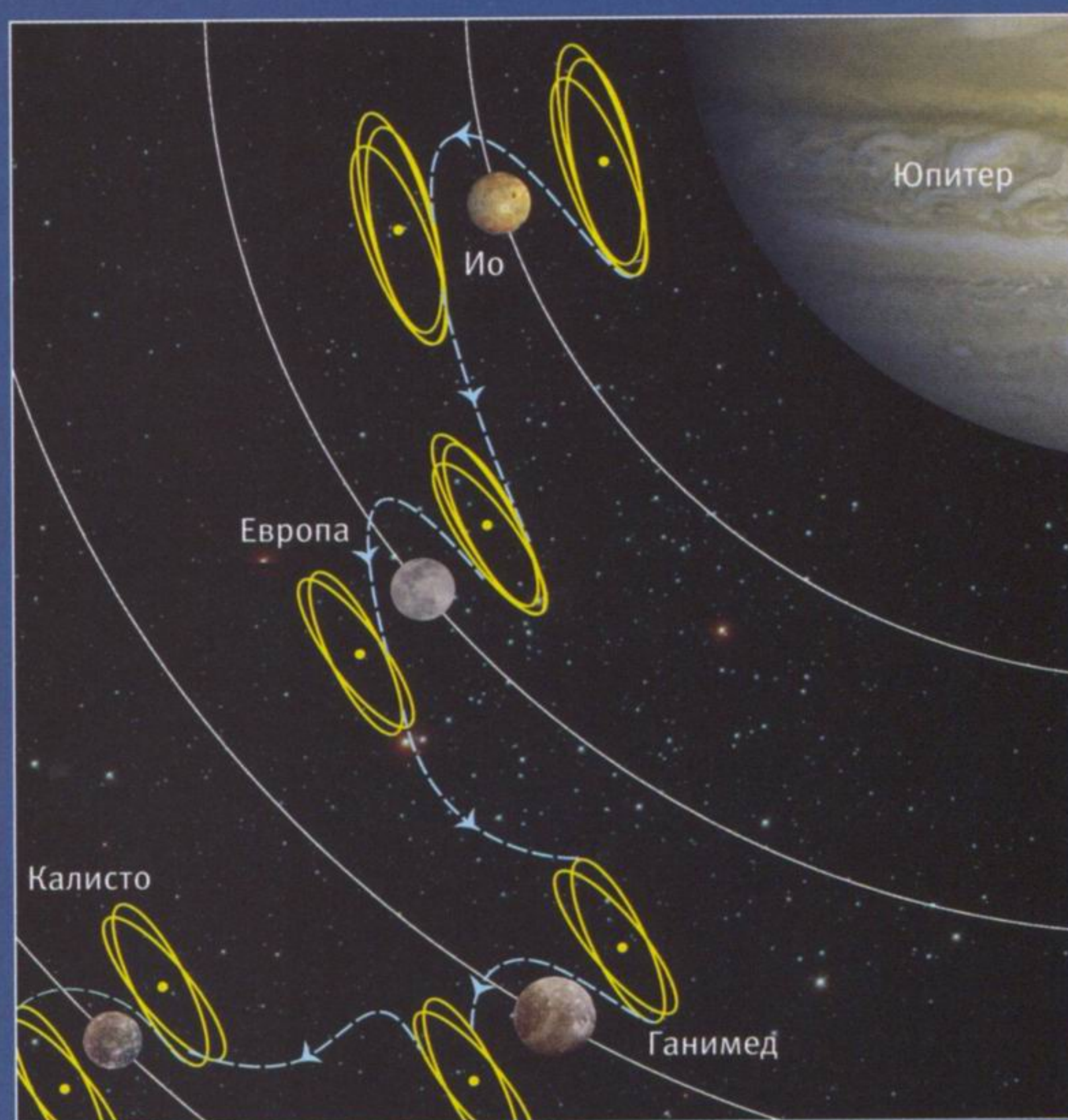
**С МАЛОЙ ТЯГОЙ К МАЛЫМ ТЕЛАМ**

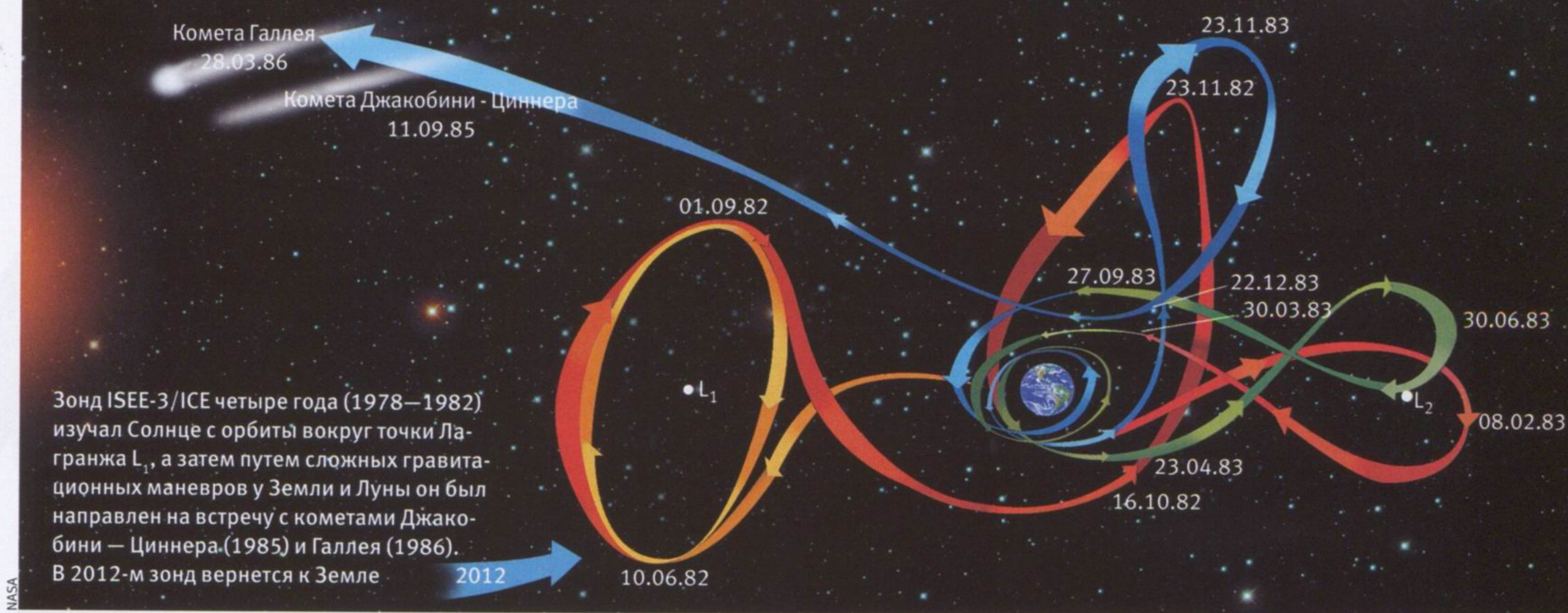
Но гравитационные маневры — не единственный способ сэкономить топливо. Еще в 1930-х годах один из пионеров отечественного ракетного двигателестроения Валентин Петрович Глушко предложил использовать электроракетные двигатели (ЭРД). По сравнению с традиционными жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) скорость истечения рабочего тела у них на порядок выше, а значит, топлива требуется в сотни раз меньше. К сожалению, тяга ЭРД исчисляется величинами порядка нескольких граммов-силы, так что для вывода аппаратов на орбиту они не годятся. Это «двигатели открытого космоса», предназначенные для медленного, но непрерывного ускорения, длящегося месяцы, а при межпланетных полетах и годы. «Миссии с малой тягой» стали популярны лишь тогда, когда электроника, сделав гигантский скачок, позволила

**ЛЕСТНИЦА ЛАГРАНЖА**

Несмотря на коррекции и гравитационные маневры, орбиты большинства межпланетных станций все же близки к классическим дугам эллипсов и гипербол. Но в последнее время астронавигаторы все чаще используют куда более изощренные траектории, пролегающие в тех областях пространства, где приходится в равной мере учитывать притяжение сразу двух небесных тел. Рассмотрим, например, орбиту Земли вокруг Солнца. Она почти круговая с радиусом 150 миллионов километров и периодом обращения, равным году. Соотношение радиуса и периода определяется силой солнечного притяжения, заставляющей Землю двигаться по искривленной траектории. На большем расстоянии притяжение Солнца окажется слабее, а соответствующая орбитальная

скорость ниже. Космический аппарат на такой орбите отстает от Земли (а на орбите меньшего радиуса обгоняет ее). Математически это выражается третьим законом Кеплера. Однако из этого правила есть исключение. Допустим, мы запустили станцию так, чтобы она пришла в некую точку, расположенную на продолжении земной тени, причем на строго определенном расстоянии от Земли (примерно полтора миллиона километров). Тогда притяжение нашей планеты, добавленное к солнечному, окажется как раз таким, что период обращения по расширенной орбите будет в точности равен году. Получится, что станция как бы все время прячется от Солнца позади Земли. Аналогичная траектория есть и внутри земной орбиты, где притяжение планеты,





увеличить срок службы космических аппаратов с нескольких месяцев до нескольких лет, а то и десятилетий.

Трасса полета с малой тягой совсем не похожа на классический эллипс, она представляет собой медленно разворачивающуюся спираль Архимеда. Переход с низкой околоземной орбиты на геостационарную по такой траектории затягивается на полгода. Это поистине пытка для владельца спутника, продающего услуги космической связи: каждый день ожидания обходится в десятки тысяч долларов. Приходится учитывать и такое неприятное обстоятельство, как многократный пролет через радиационные пояса Земли. Тонкая электроника очень не любит космических излучений. Но зато спутник, оснащенный ЭРД, можно запустить на геостационарную орбиту ракетой «Союз» (300 тонн), а для аппарата ▶

## Гравитацию, так трудно преодолеваемую при старте с Земли, в межпланетном полете можно использовать для набора скорости



наоборот, ослабляет солнечное ровно настолько, чтобы на более короткой орбите период обращения был равен году. На таких орбитах станции будут обращаться вокруг Солнца, оставаясь неподвижными относительно Земли, — в направлении к Солнцу и от него. Это так называемые точки Лагранжа  $L_1$  и  $L_2$ , где космический аппарат может неподвижно висеть, не расходуя топлива. Этим уже пользуются: в  $L_1$  работает солнечная обсерватория SOHO, а в  $L_2$  — астрофизический зонд WMAP. Туда же планируется вывести 6-метровый телескоп имени Джеймса Вебба, который строится на смену стареющему «Хаббл».

Но полеты в точках Лагранжа не лишены трудностей. Дело в том, что равновесие в них неустойчиво. Стоит аппарату немного отклониться из-за возмущений

со стороны других планет или погрешностей навигации, как он начинает описывать вокруг точки Лагранжа медленно расходящиеся петли. Если вовремя не скорректировать орбиту, аппарат может быть выброшен в космос или даже упасть на Землю. Рассчитать движение по такой траектории очень трудно: она очень сильно «крутит хвостом» — при малейшей ошибке в начальных условиях может повернуться в противоположном направлении.

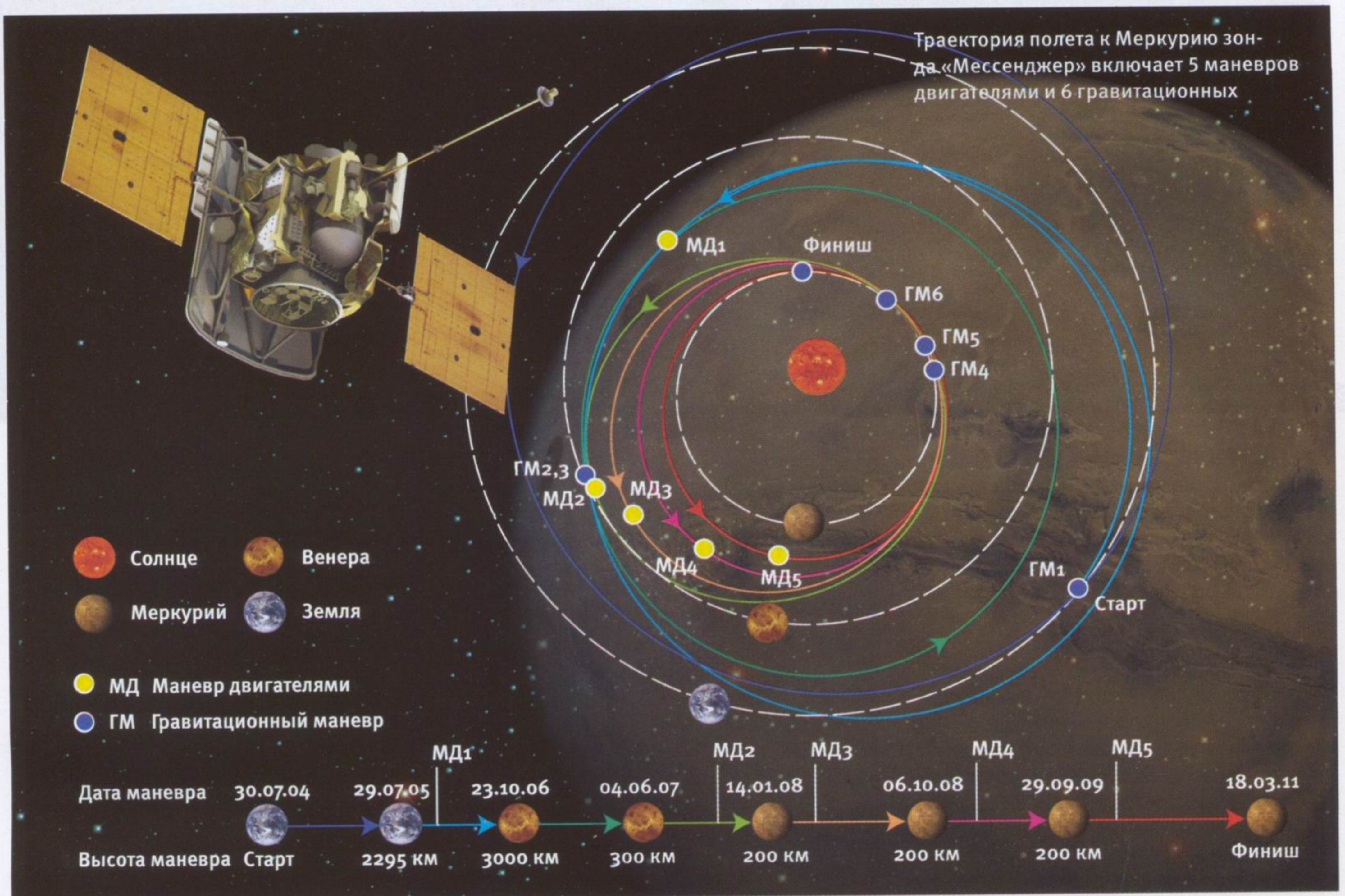
И все же NASA уже удалось воспользоваться такой сложной орбитой для миссии по сбору образцов солнечного ветра. Аппарат «Генезис» (Genesis) был запущен по тончайшим образом выверенной траектории, которая после нескольких витков вокруг точки  $L_1$  вернула его к Земле, причем так, что капсула с образцами по

касательной вошла в атмосферу и совершила посадку (к сожалению, жесткую из-за сбоя в парашютной системе). А у навигаторов тем временем зреют новые планы. Среди раскручивающихся траекторий ухода от точки  $L_1$  есть такие, которые на время приводят аппарат на орбиту вокруг  $L_2$  (и наоборот). Причем для этого не требуется серьезных затрат топлива. У Земли пользы от этого немного. Иное дело — система Юпитера, где у каждого из четырех его больших спутников — Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто — есть по паре точек Лагранжа. Двигаясь вокруг планеты, внутренние спутники обгоняют внешние, и если правильно подгадать, то ценой совсем небольших затрат топлива аппарат может перепрыгнуть с неустойчивой орбиты вокруг точки  $L_2$ , скажем, спутника Ио

на такую же орбиту вокруг точки  $L_1$  Европы. Покрутившись там и проведя наблюдения, можно подняться еще на одну ступеньку «лестницы» — к точке  $L_2$  Европы, а оттуда в нужный момент прыгнуть к  $L_1$  Ганимеда, а там и до Каллисто рукой подать. Спускаться по этой «лестнице Лагранжа» тоже не возбраняется.

Именно такой план полета предлагается для большой исследовательской станции JIMO, которую NASA готовит для изучения галилеевых спутников Юпитера. До сих пор спутники Юпитера исследовались только с пролетных траекторий. «Лестница Лагранжа» позволит станции подолгу зависать над спутником — детально изучать его поверхность и отслеживать происходящие на ней процессы.

Александр Сергеев



## В поисках быстрых и экономных траекторий космическая баллистика балансирует на грани искусства и точных расчетов

с обычным ЖРД уже нужен могучий «Протон» (700 тонн). Разница в стоимости запуска — в два-три раза. Вот и ломает голову заказчик космического аппарата: какой вариант выбрать? Обычно все же останавливаются на том, что быстрее: современные спутники связи начинают «отбивать» затраченные на их запуск деньги уже через пару недель после выведения на целевую орбиту. Так что в околоземном пространстве двигатели малой тяги применяют в основном для небольших коррекций орбиты.

Другое дело — полеты, скажем, к астероидам. ЭРД позволят относительно легко перекидывать межпланетную станцию с одного объекта к другому, причем не просто пролетать мимо, а подолгу задерживаться у каждого. По причине своей ничтожной (по сравнению с планетами) массы астероиды обладают мизерной гравитацией. Их облет мало похож на обычное орбитальное движение вокруг больших планет. Орбитальные скорости здесь измеряются сантиметрами в секунду, а периоды — многими сутками. Чтобы облететь астероид быстрее, приходится почти постоянно «работать двигателями».

Стоит их выключить, и аппарат просто улетит от планетоида. Но зато практически полное отсутствие гравитации позволяет садиться на поверхность астероида и взлетать с него при минимальных затратах топлива.

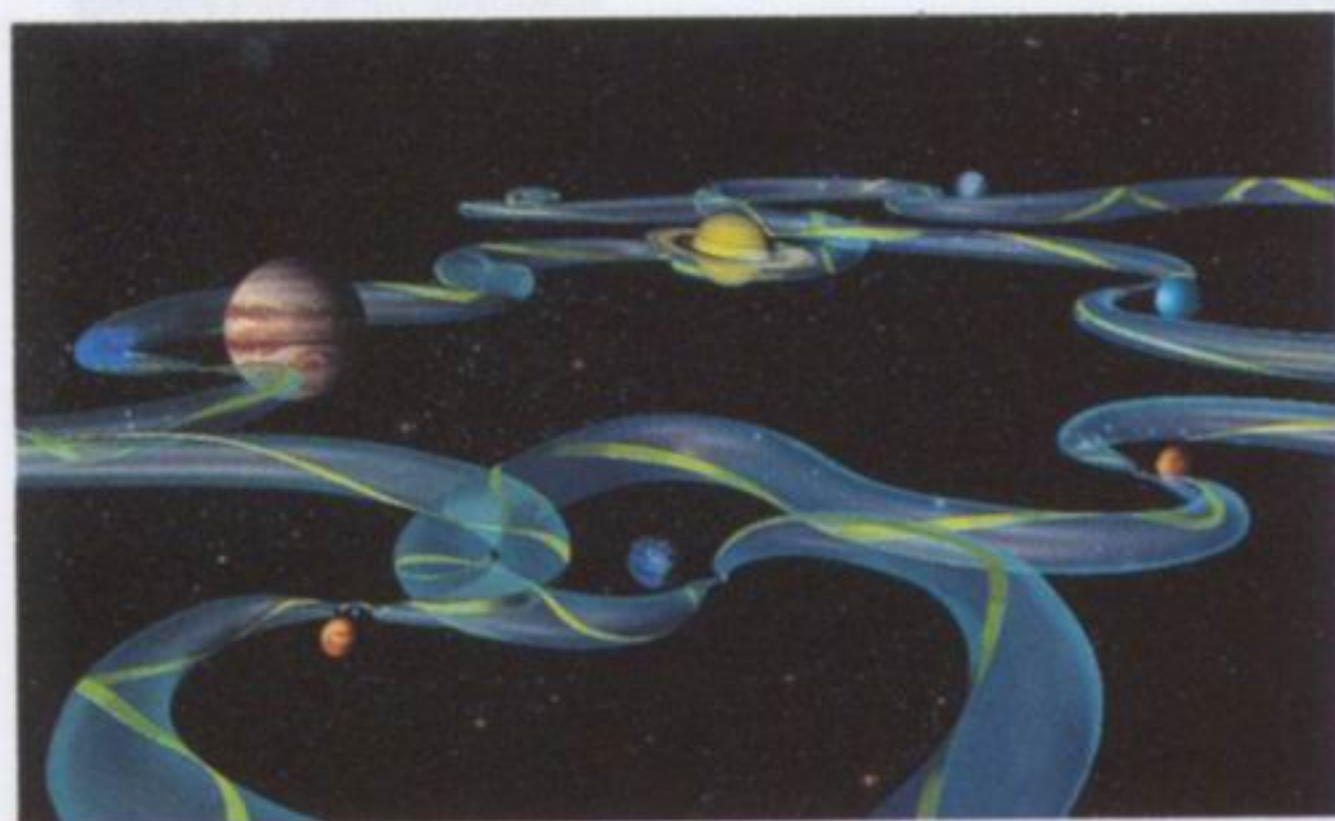
По большому счету слово «посадка» здесь можно употреблять лишь условно: причаливание межпланетного зонда к астероиду больше напоминает стыковку двух космических кораблей, нежели классическую посадку на поверхность планеты. Этот фокус проделывали японцы со своим зондом «Хаябуса», который дважды опускался на поверхность астероида Итокава и поднимался с нее. Кстати, этот же полет показал, насколько непросто управлять аппаратом вблизи поверхности астероида. Обмен сигналами с аппаратом занимает десятки минут, так что отдавать ему команды в реальном времени невозможно, несмотря на небольшие скорости. Поэтому отработка автономной навигации вблизи неровной поверхности астероида была одной из основных задач «Хаябуса».

Стартовавший в сентябре 2007 года к астероидам Церере и Весте американский зонд «Заря» (Dawn) оснащен

ионными двигателями с тягой меньше одной десятой Ньютона (вес 10-гранного груза). За сутки работы они ускоряют аппарат массой около тонны на 25 км/ч. Это не так мало, как может показаться: за год подобными темпами можно набрать 2,5 км/с. Полного же запаса топлива на борту (425 килограммов) хватит для изменения скорости аппарата на 10 км/с — никаким межпланетным аппаратам с химическими двигателями подобное недоступно.

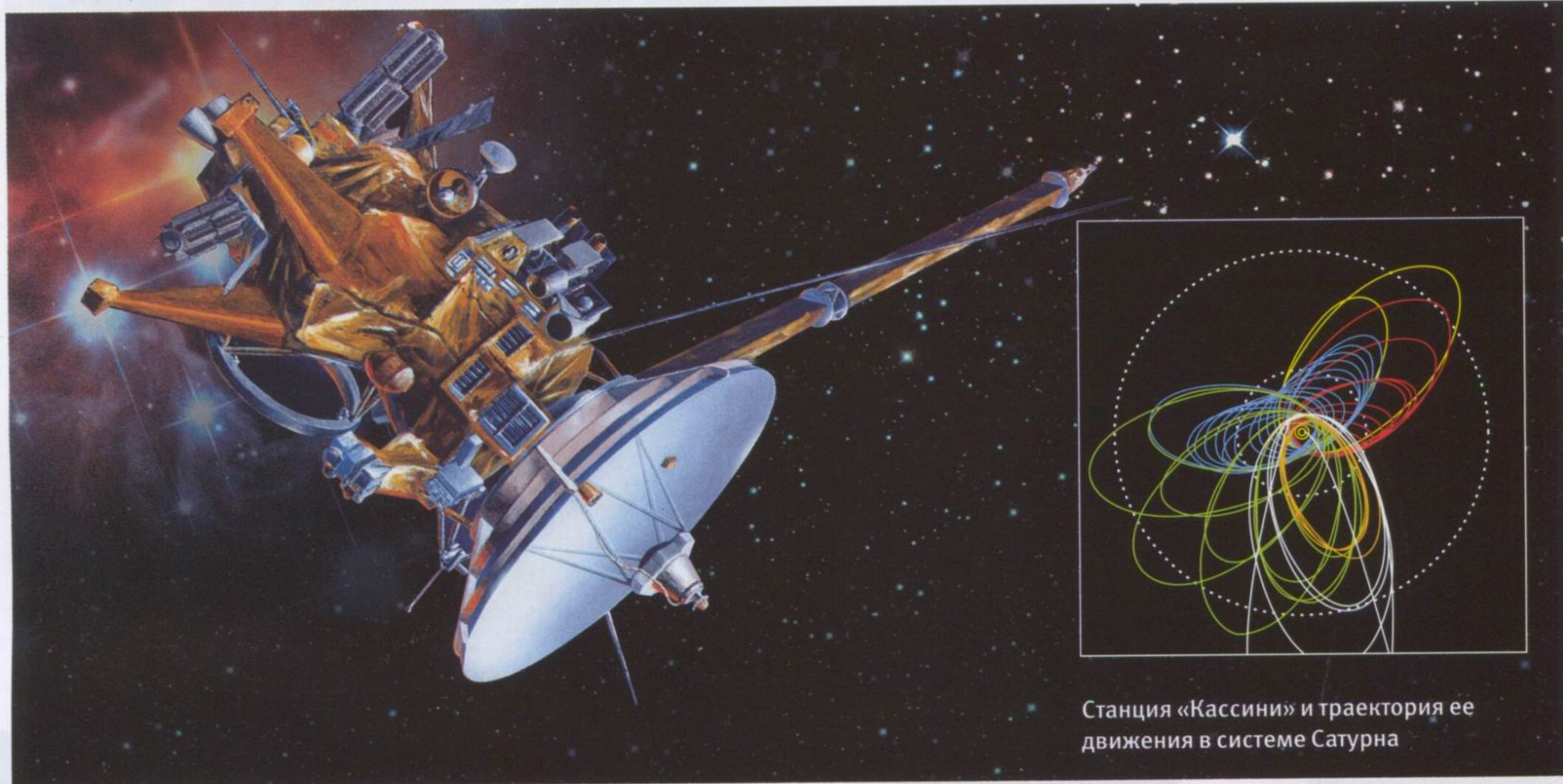
### ПЛАНЕТАРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Попробуем пофантазировать и представим, что наконец-то решено отправить экипаж, состоящий из людей, скажем, в систему Сатурна. Можно выбрать быстрый перелет с большой тягой: собрать межпланетный корабль на околоземной орбите, выдать при помощи ЖРД мощный разгонный импульс и по гиперболе отправиться в путешествие. Лететь все равно придется долго — несколько лет. Масса топлива нужна огромная. А значит, для снаряжения гигантского корабля потребуется не один десяток сверхтяжелых ракет. Запасы кислорода, воды, пищи и всего, что нужно в межпланетном полете, теряются на фоне огромной массы топлива, необходимого не только для разгона у Земли, но и для торможения у цели путешествия, и для возвращения к родной планете...



## МЕЖПЛАНЕТНЫЙ СУПЕРХАЙВЕЙ

В 2002 году специалисты NASA выдвинули новую концепцию проектирования межпланетных орбит с очень низкими энергозатратами. Получив громкое название «Межпланетный суперхайвей», она, по сути, является расширением «лестницы Лагранжа» на всю Солнечную систему. Авторы работы утверждают, что если вам удалось добраться до точки Лагранжа в системе Солнце — Земля, то, правильно подобрав коррекционный импульс, вы сможете с минимальными затратами энергии добраться почти до любой другой точки Лагранжа в Солнечной системе. Надо только верно рассчитать маневры у других планет и их спутников. Именно эта идея легла в основу иллюстрации в начале этой статьи.



Станция «Кассини» и траектория ее движения в системе Сатурна

NASA/ESA

## Электрореактивные двигатели с низкой тягой, но высокой скоростью истечения буквально созданы для открытого космоса

А что если попробовать малую тягу? Безумное количество топлива существенно сократится, а срок путешествия, как ни странно, может остаться прежним! Ведь двигатели корабля будут работать всю дорогу — полпути на разгон, а полпути — на торможение. Правда, тягу электрореактивных двигателей придется увеличить в сотни раз по сравнению с теми, что стоят на зонде «Заря». Но во-первых, такие разработки уже ведутся, а во-вторых, двигателей может быть много.

Для питания ЭРД понадобится несколько мегаватт энергии. Вблизи Земли ее можно было бы получать даром — от огромных солнечных батарей площадью тысячи, если не десятки тысяч квадратных метров. Но с удалением от Солнца их эффективность быстро падает: у Марса — на 60%, у Юпитера — в 30 раз. Так что для полетов к планетам-гигантам придется использовать ядерный реактор. И еще, скорее всего, ЖРД все-таки понадобятся для того, чтобы быстрее пройти опасные радиационные пояса вблизи Земли. Видимо, именно комбинированные

двигательные установки будут применяться в межпланетных пилотируемых миссиях будущего.

### НЕ ТОЛЬКО ГРАВИТАЦИЯ

Дальний космос таит в себе немало загадок. Казалось бы, что может быть точнее баллистических расчетов, в основе которых лежат законы небесной механики? Нетут-то было! На космический зонд действует множество сил, которые трудно учесть заранее. Давление солнечного излучения и солнечный ветер, магнитные поля планет и истечение газа из самого аппарата — все это сказывается на скорости его движения. Даже тепловое излучение зонда и радиосигнал, посылаемый на Землю узконаправленной антенной, вызывают отдачу, которую приходится учитывать при точной навигации. А то что происходило с уже упоминавшимися «Пионерами», вообще не получило пока должного объяснения. Работающий в NASA российский астрофизик Вячеслав Турышев обнаружил около 10 лет назад, что зонды испытывают очень небольшое аномальное торможение. За 20 лет полета аномалия «Пионеров» привела к тому,

что, подлетая к границам Солнечной системы, космические аппараты отклонились от расчетного положения на 400 тысяч километров! Какие только гипотезы не выдвигались для объяснения аномалии. От уже упомянутых магнитных полей и испарения остатков топлива из топливных магистралей до наличия на границах Солнечной системы массивных невидимых объектов. Некоторые физики считают аномалию указанием на неточность современной теории гравитации, другие видят в ней проявление космологических факторов вроде темной материи и темной энергии. Исчерпывающего объяснения пока нет, а группа Турышева продолжает обрабатывать данные о полете «Пионеров». Как бы то ни было, при проектировании новых траекторий межпланетных полетов придется учитывать возможность подобных неожиданных явлений.

В общем, работа космического баллистика балансирует на грани искусства и точных наук. Ему всегда придется решать задачу со многими неизвестными, усугубленную стремлением заказчика сделать все «быстрее и дешевле», не выходя за рамки физических законов. Так что, несомненно, мы еще станем свидетелями рождения многих новых нетривиальных космических траекторий. ●