

ИГОРЬ ЛИСОВ

РАЗВЕДЧИКИ ВНЕШНИХ ПЛАНЕТ

ПУТЕШЕСТВИЕ
«ПИОНЕРОВ» И
«ВОЯДЖЕРОВ»
ОТ ЗЕМЛИ
ДО НЕПТУНА
И ДАЛЕЕ



АНО
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Игорь Лисов
Разведчики внешних
планет. Путешествие
«Пионеров» и «Вояджеров»
от Земли до Нептуна и далее

Текст предоставлен правообладателем

http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=67603773

*Разведчики внешних планет. Путешествие «Пионеров» и «Вояджеров»
от Земли до Нептуна и далее: Альпина нон-фикшн; Москва; 2022*

ISBN 9785001397236

Аннотация

В книге «Разведчики внешних планет: путешествие „Пионеров“ и „Вояджеров“ от Земли до Нептуна и далее» Игорь Лисов в захватывающих подробностях излагает историю подготовки, планирования, финансирования, запусков и полетов «Пионеров» и «Вояджеров» – космических аппаратов, миссией которых являлось исследование планет внешней Солнечной системы. Эти экспедиции позволили получить невероятно ценную информацию о Юпитере, Сатурне, Уране и Нептуне – небесных телах, знания человечества о которых прежде были весьма поверхностными. Два «Вояджера» и по сей день находятся в полете: постепенно теряя мощность, они перестают подавать

сигналы и уходят все дальше от Земли, за пределы Солнечной системы. Этим кораблям никогда не суждено вернуться назад, однако на своем борту «Вояджеры» несут послания землян неземным цивилизациям – на случай, если такая встреча когда-нибудь состоится.

Содержание

Предисловие	7
Введение	11
Глава 1	15
Гравитационный маневр – ключ к Солнечной системе	15
«Большой тур» начинается	29
Проект «Пионер-F/G»	46
Глава 2	69
Через пояс астероидов	69
Конец ознакомительного фрагмента.	80

Игорь Лисов
Разведчики внешних
планет. Путешествие
«Пионеров» и
«Вояджеров» от Земли
до Нептуна и далее

Научный редактор *Дмитрий Вибе, д-р физ. – мат. наук*

Редактор *Ирина Сисейкина*

Издатель *П. Подкосов*

Руководитель проекта *А. Шувалова*

Ассистент редакции *М. Короченская*

Корректоры *Е. Чудинова, И. Астапкина*

Компьютерная верстка *А. Ларионов*

Арт-директор *Ю. Буга*

Дизайн обложки *А. Бондаренко*

© Лисов И., 2022

© ООО «Альпина нон-фикшн», 2022

Все права защищены. Данная электронная книга предназначена исключительно для частного использования в лич-

ных (некоммерческих) целях. Электронная книга, ее части, фрагменты и элементы, включая текст, изображения и иное, не подлежат копированию и любому другому использованию без разрешения правообладателя. В частности, запрещено такое использование, в результате которого электронная книга, ее часть, фрагмент или элемент станут доступными ограниченному или неопределенному кругу лиц, в том числе посредством сети интернет, независимо от того, будет предоставляться доступ за плату или безвозмездно.

Копирование, воспроизведение и иное использование электронной книги, ее частей, фрагментов и элементов, выходящее за пределы частного использования в личных (некоммерческих) целях, без согласия правообладателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

* * *

Ане Горельшиевой

Предисловие

5 ноября 2018 г. американский космический аппарат «Вояджер-2» пересек на расстоянии 17,8 млрд км от Солнца границу, отделяющую вещество Солнечной системы от межзвездного. Шел 42-й год с момента запуска самого знаменитого межпланетного зонда, который отправился в космос с мыса Канаверал 20 августа 1977 г. На его счету были пионерские исследования всех четырех планет-гигантов Солнечной системы – Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, – выполненные за 12 первых лет полета. Следующие 30 лет «Вояджер-2» пунктуально передавал на Землю данные о солнечном ветре и об обстановке в ударной волне и гелиослое, и вот теперь он прошел гелиопаузу и оказался в потоке межзвездного вещества.

Никто в обозримой перспективе не сможет повторить этот научно-технический подвиг. «Вояджер-2» использовал уникальное расположение внешних планет, подобного которому не случится до 2154 г. Если бы не это обстоятельство, первая разведка газовых гигантов случилась бы намного позднее и обошлась бы в несколько раз дороже. И хотя позднее земные аппараты изучили подробно системы Юпитера и Сатурна и достигли Плутона, «Вояджер-2» до сих пор остается единственным посланцем человечества, который побывал вблизи Урана и Нептуна.

Пионерский этап исследования внешних планет занял 17 лет, с 1972 по 1989 г., и был реализован всего четырьмя американскими космическими аппаратами: двумя «Пионерами» с номерами 10 и 11 и двумя более сложными и совершенными «Вояджерами». Их жизнь и судьба от идеи до старта и на протяжении всего полета является темой книги, которую вы держите в руках. В основу ее положены материалы о «Пионерах» и серия статей о «Вояджерах», опубликованные нами в 2007–2017 гг. в журнале «Новости космонавтики». В подготовке некоторых из них участвовали Анатолий Копик и Павел Шаров, чей вклад автор отмечает с благодарностью. История «Вояджеров», однако, потребовала значительной доработки, а несколько глав по «Пионерам» были по существу написаны заново.

Читатель вправе спросить, почему мы ограничились двумя проектами и четырьмя аппаратами и не включили в повествование детективную историю зонда «Новые горизонты», впервые достигшего Плутона в июле 2015 г. Краткий ответ состоит в том, что в полет к Плутону отправился аппарат совсем другого поколения и другой эпохи и что сам Плутон является не большой планетой, а лишь одним из самых крупных астероидов занептунного пояса (известного также как пояс Койпера), хотя и самым известным из них и очень интересным. Кроме того, это обязало бы нас рассказать и о трех других аппаратах, исследовавших дальние планеты, – о «Галилео» и «Кассини», в течение многих лет успешно ра-

ботавших на орбитах вокруг Юпитера и Сатурна, и о новой юпитерианской станции «Джуно». К счастью, история «Новых горизонтов» уже описана руководителем этого проекта доктором Аланом Стерном и издана в отличном переводе Виктории и Александра Краснянских¹.

Среди источников необходимо в первую очередь назвать описания проектов «Пионер» и «Вояджер», изданные Национальным управлением по аэронавтике и космосу NASA: *The Pioneer Mission to Jupiter (SP-268)*, *Pioneer Odyssey: Encounter with a Giant (SP-349)*, *Pioneer Odyssey (SP-396)*, *Pioneer: First to Jupiter, Saturn, and Beyond (SP-446)*, *Voyage to Jupiter (SP-439)*, *Voyages to Saturn (SP-451)*. Все содержащиеся в них данные были перепроверены, дополнены и исправлены по пресс-релизам NASA и его центров за период с 1969 г., по отчетам Сети дальней связи DSN о сопровождении межпланетных аппаратов и реконструкции ее технических средств, по научным статьям о результатах исследований в области планетологии, физики космической среды и небесной механики.

Автор считает своим долгом предупредить, что вы держите в своих руках сложную книгу, полную технических терминов, сокращений из трех и более букв, а также дат, диаграмм и таблиц. Тем большей будет радость читателя, кото-

¹ Стерн А., Гринспун Д. За новыми горизонтами: Первый полет к Плутону. – М.: Альпина нон-фикшн, 2020. – *Здесь и далее примечания автора, если не указано иное.*

рый с нашей помощью сумеет разобраться в исторических и технических деталях этой удивительной и героической истории.

Введение

Историю пионерских исследований ближайших к Земле планет Солнечной системы – Венеры и Марса – можно рассматривать через призму напряженного соперничества США и СССР. Хотя советские станции были первыми отправлены к Венере (февраль 1961 г.) и Марсу (ноябрь 1962 г.), заданную программу изучения этих планет первыми смогли выполнить американские космические аппараты (КА). «Маринер-2» был запущен 27 августа 1962 г. и впервые исследовал Венеру с пролетной траектории 14 декабря того же года. «Маринер-4» стартовал 5 ноября 1964 г. и впервые отснял на пролете с близкой дистанции планету Марс 15 июля 1965 г.

«Венера-7» первой сумела достичь в рабочем состоянии поверхности Венеры 15 декабря 1970 г. Последующие советские аппараты внесли определяющий вклад в изучение этой негостеприимной планеты, хотя американские станции «Маринер-5» и «Пионер-Венера» (орбитальный аппарат и атмосферные зонды) тоже выступили неплохо. «Марс-3» первым совершил мягкую посадку на Марс 2 декабря 1971 г., но, к несчастью, сразу после этого прекратил работу. Основные «сливки» в первоначальном изучении Марса сняли американцы – «Маринер-9» долго и плодотворно работал на орбите вокруг планеты, а два «Викинга» летом и осенью 1976 г.

выполнили успешные посадки на Марс, изучили грунт планеты и попытались найти признаки жизни.

К сожалению, ни одно из предложений советских разработчиков по созданию КА для исследования дальних планет не было принято к реализации. На изучение Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна отправлялись только американские и позднее европейские аппараты.

«Пионер-10», запущенный 3 марта 1972 г., выполнил первый пролет и исследования Юпитера 2 декабря 1973 г.

«Пионер-11», который стартовал 6 апреля 1973 г., прибыл к Юпитеру 3 декабря 1974 г., а от него направился к Сатурну, которого впервые достиг 1 сентября 1979 г.

«Вояджер-1» был запущен 5 сентября 1977 г. и провел более подробное изучение систем Юпитера и Сатурна в ходе пролетов 5 марта 1979 г. и 12 ноября 1980 г.

«Вояджер-2» отправился в путь 20 августа 1977 г. и последовательно посетил все четыре гигантские планеты: 9 июля 1979 г. – Юпитер, 26 августа 1981 г. – Сатурн, 24 января 1986 г. – Уран и 25 августа 1989 г. – Нептун. Практически все, что мы знаем о двух последних, основано на данных приборов «Вояджера-2».

Подсчитано, что уже к моменту пролета «Вояджера-2» у Нептуна на Землю было передано около 5 трлн бит научных данных. Но это – бесстрастные числа, а по сути именно «Пионеры» и «Вояджеры» открыли нам внешние планеты Солнечной системы. На потрясающих воображение снимках

мы увидели новые, неизвестные миры. Многие загадки планет-гигантов и их спутников будоражат умы ученых и по сей день.

Все четыре КА в результате встреч с планетами развили скорости, достаточные для того, чтобы навсегда покинуть Солнечную систему. «Вояджер-1» является лидером этого парада. 6 августа 2020 г. он ушел от Солнца на 150 астрономических единиц, то есть оказался от него в 150 раз дальше, чем Земля. Это самый далекий космический аппарат, когда-либо запущенный в космос человеком (см. таблицу 1), и конкурентов ему, по крайней мере в ближайшие десятилетия, не предвидится.

Оба «Вояджера» уже вышли за пределы той области околосолнечного пространства, где доминирует истекающий от Солнца поток вещества, проникли в межзвездную среду и регулярно сообщают нам сведения о ней. Руководители полета надеются, что вплоть до 50-летней годовщины запуска аппараты все еще будут передавать научную информацию.

Таблица 1. Пять КА, покидающие Солнечную систему (по состоянию на 01.01.2022)

АМС	Дата запуска	Гелиоцентрические		Геоцентрические		Время прохождения радиосигнала до Земли, мин	Эклиптическая широта	Склонение	Прямое восхождение	Созвездие
		Расстояние, а. е.	Скорость, км/с	Расстояние, а. е.	Скорость, км/с					
Пионер-10	03.03.1972	130,054	11,918	129,134	35,531	1073,9	2,992°	26,045°	78,561°	Телец
Пионер-11	06.04.1973	106,863	11,200	107,815	34,301	896,6	13,964°	-8,942°	283,690°	Щит
Вояджер-2	20.08.1977	129,030	15,304	129,800	36,104	1079,5	-37,393°	-58,358°	301,763°	Павлин
Вояджер-1	05.09.1977	155,010	16,934	155,746	30,573	1295,2	35,104°	12,005°	258,674°	Змееносец
Новые горизонты	19.01.2006	52,057	13,828	53,033	35,972	441,0	1,975°	-20,411°	288,372°	Стрелец

Глава 1

«Пионеры» Юпитера

Гравитационный маневр – ключ к Солнечной системе

Главной идеей при создании «Пионеров» и «Вояджеров» было использование гравитационного маневра в поле тяготения одной планеты с набором скорости для полета к другой. Если бы аппараты летели по «классическим» полуэллипсам Вальтера Гоманна, описанным им в 1925 г., то перелет до Нептуна, например, занял бы почти 31 год вместо 12, не говоря уже о том, что одна станция смогла бы исследовать лишь одну планету.

Вся история космонавтики – это история достижения все более высоких скоростей. Спутник на низкой околоземной орбите высотой 200 км имеет скорость 7790 м/с. Чтобы долететь до Луны, нужно увеличить ее как минимум до 10 920 м/с. Если добавить еще чуть-чуть – какие-то 100 м/с, то полная энергия относительно Земли станет положительной, а значит, ваш космический аппарат уйдет в бесконечность по гиперболе и не вернется.

Но всякая прибавка скорости в космонавтике оплачива-

ется расходом топлива в соответствии с формулой Циолковского. Когда стартовали «Пионеры» и «Вояджеры», высокоэффективные электроракетные двигатели только создавались и не было опыта длительного разгона с характерной для них малой тягой, обретенного в самом конце XX в. В 1970-е гг. можно было рассчитывать лишь на традиционные жидкостные (ЖРД) или твердотопливные (РДТТ) ракетные двигатели.

Ракета «Союз» выводила на низкую орбиту КА массой около 7000 кг. «Молния» – тот же «Союз» с четвертой ступенью – отправляла к Луне до 1600 кг при стартовой массе 305 т. На этом примере можно увидеть и цену выхода на орбиту, и плату за добавку в 3100 м/с, от скорости спутника до скорости освобождения.

Достижение планет требует намного бóльших скоростей.

Земля обращается вокруг Солнца со средней скоростью 29,78 км/с. Среднее расстояние до светила называется астрономической единицей (а.е.), которая в привычных нам единицах равна 149,6 млн км. Более строгое описание гласит, что Земля обращается по эллипсу, в одном из двух фокусов которого находится Солнце, и что одна а.е. – это большая полуось ее орбиты². Однако этот эллипс довольно близок к окружности, и для оценочных расчетов различием между

² В 2012 г. Международный астрономический союз зафиксировал величину астрономической единицы 149 597 870 700 м, фактически отвязав ее от параметров орбиты Земли. – *Прим. науч. ред.*

ними можно пренебречь.

Рассмотрим абстрактную задачу перелета от Земли к Нептуну. Для простоты будем считать орбиту Нептуна круговой с радиусом 30 а.е. и лежащей в той же плоскости, что и земная орбита. (Эта плоскость называется также плоскостью эклиптики – она пересекает небесную сферу по линии видимого годового движения Солнца.) Можно доказать, что среди всех возможных траекторий перелета минимальную скорость отправления имеет половинка эллипса, касающегося земной орбиты в своей ближайшей к Солнцу точке – в перигелии – и орбиты Нептуна в самой далекой точке – в афелии. Простые формулы небесной механики позволяют вычислить скорость в перигелии, необходимую для удаления на 30 а.е., – это 41,43 км/с. Это значит, что к имеющейся средней орбитальной скорости Земли надо добавить еще 11,65 км/с. Естественно, в правильном направлении – в том же, в котором летит наша планета. Если две скорости имеют различные направления, нужно будет выполнить векторное сложение, осознавая при этом, что сумма окажется меньше ожидаемой. И естественно, нужно стартовать в совершенно определенную дату – иначе после 30,6 года пути окажется, что Нептун находится не там, куда мы прилетели, а в абсолютно иной точке своей орбиты.

Величина 11,65 км/с ужасает, тем более что это не отлетная, а остаточная скорость КА – уже после того, как он преодолел притяжение Земли и ушел от нее «на бесконечность».

На самом деле не все так страшно. Нам не потребуется добавлять к типичной скорости освобождения 11,02 км/с еще столько же и даже больше.

Из закона сохранения энергии следует, что, если из квадрата начальной скорости у Земли вычесть квадрат скорости освобождения на этой же высоте, получится квадрат остаточной скорости объекта. (В баллистических расчетах указанную величину называют характеристической энергией и обозначают символом C_3 .)

Вот почему для нашего условного гоманновского перелета к Нептуну достаточно уйти с низкой орбиты в правильный момент и в правильном направлении со скоростью 16,04 км/с, которая «всего» на 5,02 км/с выше скорости освобождения. И тогда не исключено, что через 30,6 года КА будет еще жив и что-нибудь сообщит. Конечно, можно немного распрямить траекторию и сократить время перелета – но за счет увеличения отлетной скорости, которая, конечно, меньше той, что мы вообразили, но все же очень велика.

За всю историю космонавтики только один раз была реализована отлетная скорость выше рассчитанной нами – 19 января 2006 г. при отправке КА «Новые горизонты» к Плутону. Получив начальную геоцентрическую скорость 16,21 км/с, этот аппарат достиг цели после 9,5 лет полета. «Вояджер-2» отправился в путь, имея лишь 15,20 км/с, и все же за 12 лет добрался до Нептуна. Согласитесь, 9,5 или 12 лет – это намного лучше, чем 31 год. Волшебное сред-

ство сокращения продолжительности межпланетного полета и называется гравитационным (пертурбационным) маневром.

Зададим себе такой вопрос: что значит «уйти на бесконечность» после старта с Земли? Он имеет смысл для ограниченной задачи трех тел – двух центров притяжения, Солнца и Земли, и движущегося под их действием объекта. В первом приближении можно говорить о пересечении некой границы, до которой мы еще должны рассматривать гиперболическое движение КА относительно родной планеты, пусть и возмущаемое Солнцем, а после уже имеем право считать его спутником Солнца, хотя и испытывающим остаточное возмущение Земли. Эта граница имеет форму, близкую к сфере радиусом 1 млн км, которая называется сферой действия Земли. Так как Юпитер намного массивнее, его сфера действия обширнее, ее радиус – 55 млн км.

Допустим, мы летим от Земли на межпланетном корабле по орбите с афелием около 9 а.е., пересекающей орбиту Юпитера на расстоянии 5,2 а.е. от Солнца. Более того, мы выбрали траекторию так, что пройдем вблизи Юпитера, но все же не попадем в него. (Не пытайтесь проделать это в реальности – там очень мощная радиация!) Чтобы понять в первом приближении, что из этого получится, разделим наш путь на три части: до входа в сферу действия планеты, внутри этой сферы и после выхода из нее. Снаружи мы считаем единственным притягивающим центром Солнце, а внутри –

только Юпитер.

На входе в сферу действия мы имеем скорость корабля в гелиоцентрической системе отсчета. Зависимость ее от конкретной точки входа довольно существенна, но на ход рассуждений это не влияет. Примем, что точка входа находится в ближайшей к Солнцу части сферы действия, где скорость корабля составляет 13,7 км/с. Орбитальная скорость Юпитера в этой же системе близка к 13,1 км/с. Чтобы определить начальные условия полета относительно планеты, мы должны вычесть из вектора нашей гелиоцентрической скорости на входе вектор скорости Юпитера – честно нарисовать треугольник скоростей и найти их разность по правилам векторной алгебры. Учитывая, что угол между двумя векторами в нашем случае близок к 53° , планетоцентрическая скорость корабля составит 11,9 км/с.

В пределах сферы действия мы движемся по гиперболической орбите относительно Юпитера, параметры которой определяются вектором состояния (три координаты и три компоненты скорости) в точке входа. По гиперболической – потому что пришли из бесконечности с ненулевой относительной скоростью и имеем положительную полную энергию относительно планеты. Нельзя оказаться на орбите вокруг Юпитера или любой другой планеты без специальных ухищрений!

Результат облета сильнее всего зависит от положения точки входа, которое задается предшествующей межпланетной

траекторией и проведенными на подлете коррекциями. Чем ближе к планете мы пролетим, тем сильнее ее тяготение завернет нашу траекторию. К примеру, мы могли подходить с таким расчетом, чтобы траектория полета указывала на точку правее Юпитера на 15 его радиусов – эта величина называется прицельной дальностью. В реальности минимальное расстояние от центра планеты будет намного меньше, и, если прицельная дальность выбрана неправильно, мы можем столкнуться с планетой. Но мы взяли прицельную дальность с запасом, а потому благополучно огибаем Юпитер и возвращаемся к границе сферы действия, имея ту же самую величину скорости 11,9 км/с, что и при входе, но другое направление полета. Заходили вдоль одной асимптоты гиперболы, выходим вдоль второй.

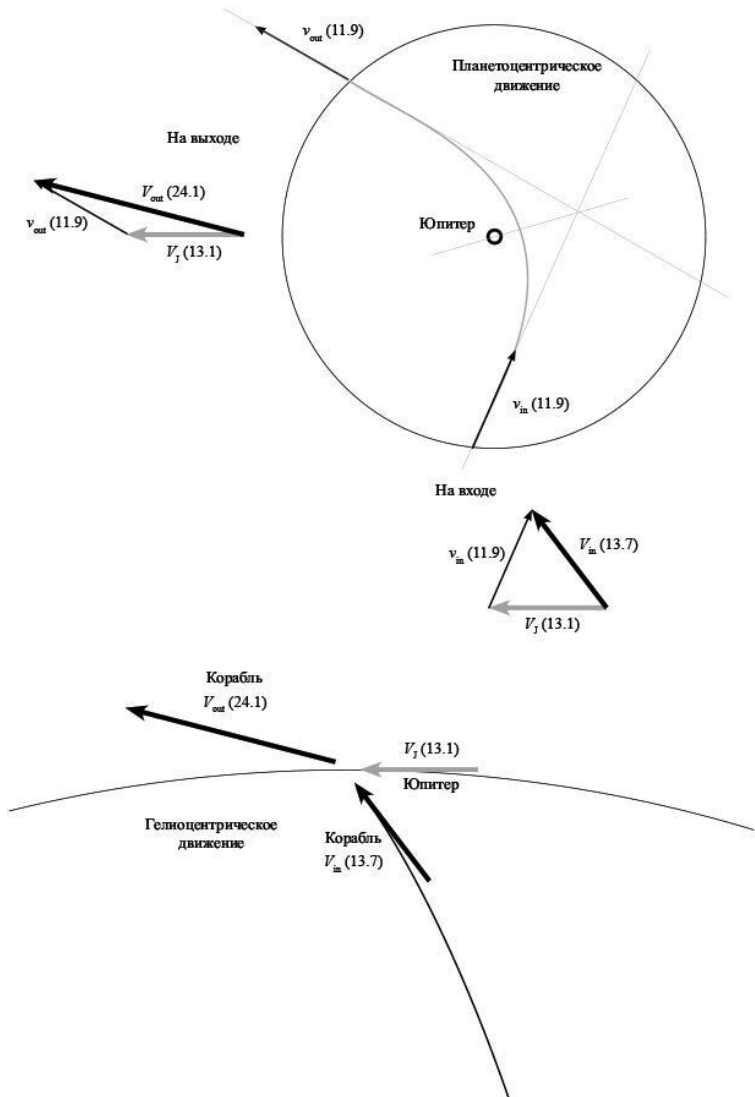
Мы прощаемся с планетой, для чего векторно складываем с нашей новой скоростью относительно Юпитера скорость планеты относительно Солнца. Последняя имеет прежнюю величину и лишь слегка отклонилась по направлению – мы считаем, что пролет длился недолго по сравнению с периодом обращения планеты, и на самом деле так оно и есть. Однако направление отлетной скорости сильно изменилось: в нашем случае корабль повернул на 84° влево. Треугольник скоростей выглядит совсем иначе, и мы заканчиваем сближение с иной гелиоцентрической скоростью и по величине, и по направлению, нежели скорость входа. Теорема косинусов подсказывает, что величина скорости относительно Солнца

увеличилась до 24,1 км/с!

Да, скорость корабля увеличилась на 75 % – и это произошло оттого, что мы позаимствовали немного энергии у Юпитера и чуть-чуть притормозили его орбитальное движение. В общем случае могло быть и наоборот – мы отдали бы часть энергии планете, а сами замедлились. Достаточно интересно «поиграть» с этими векторами, считая задачу двумерной и рассматривая события «сверху», со стороны Северного полюса мира. Несложно показать, что при облете планеты с задней полусферы корабль выйдет с большей скоростью, чем имел на входе, а с передней – наоборот.

Самый первый пертурбационный маневр в истории космонавтики был выполнен в ходе полета советской межпланетной станции Е-2А («Луна-3»), запущенной 4 октября 1959 г. на сильно вытянутую эллиптическую, почти параболическую орбиту спутника Земли. Выполняя облет Луны с целью фотографирования ее обратной стороны, станция затормозила, изменила свою траекторию на чисто эллиптическую меньшего размера и вернулась затем к Земле с направления, благоприятного для передачи изображений. Этот полет стал возможным в результате пионерских работ В. А. Егорова, М. Л. Лидова, Д. Е. Охоцимского и их коллег из Математического института АН СССР, выполненных в 1957 г. под руководством академика М. В. Келдыша.

В США к идее гравитационных маневров пришли своим путем.



Летом 1961 г. в Группе траекторий Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL) стажировался 26-летний студент-математик из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе Майкл Эндрю Минович. Решив поставленную перед ним конкретную математическую задачу определения параметров траектории полета в поле тяготения между двумя заданными точками при фиксированном времени перелета, он заинтересовался проблемой расчета траектории КА, выполняющего облет Марса с последующим возвращением к Земле. Будучи одним из вариантов ограниченной задачи трех тел, аналитического решения она не имела, а численный расчет на имеющемся в JPL компьютере IBM 7090 сходился далеко не всегда.

Минович придумал способ приближенной оценки параметров облетной траектории, пригодных для дальнейшего численного расчета, и заметил интереснейшую вещь: энергия КА после сближения с планетой – если измерять ее в системе отсчета, связанной с Солнцем, – может очень значительно отличаться от энергии до сближения.

В августе Майкл подготовил 47-страничный доклад с алгоритмом расчета траекторий в случае последовательного пролета нескольких планет. Молодой автор показал, что, войдя с нужного направления в поле тяготения планеты, можно «позаимствовать» часть ее энергии и выйти в другом направлении со значительно большей энергией и гелио-

центрической скоростью. В частности, на выходе можно получить направление и скорость, позволяющие направить аппарат к другой, более далекой планете. При этом скорость отлета от Земли может оказаться меньше, а время перелета – короче, чем если бы аппарат сразу запускался ко второй планете. Аналогичный «фокус» можно проделать и у второй планеты – и направиться к третьей. В качестве иллюстрации Минович предложил для расчета траекторию Земля – Венера – Марс – Земля – Сатурн – Плутон – Юпитер – Земля.

Руководитель Майкла встретил эту инициативную работу без энтузиазма, и Миновичу пришлось самостоятельно программировать свои уравнения и вводить исходные данные – координаты девяти планет на 1960–1980 гг. Он проводил расчеты с января 1962 по сентябрь 1964 г. на институтском компьютере, а с июня 1962 г. и на машинах в JPL, после того как продемонстрировал руководителю Группы траекторий Виктору Кларку свои результаты расчета траектории Земля – Венера – Марс – Земля и получил поддержку.

В марте 1963 г. Минович представил в JPL официальный отчет на 130 страницах уже с конкретными вариантами траекторий Земля – Венера – Меркурий и Земля – Венера – Марс. Среди них, в частности, была и та трасса, по которой спустя десять лет проследовала американская АМС «Маринер-10» (Mariner 10). Она была запущена 3 ноября 1973 г. и совершила 5 февраля 1974 г. пролет Венеры, благодаря которому была направлена к своей главной цели – Меркурию.

Это и был первый гравитационный маневр в американской космической программе.

Весной и летом 1963 г. Минович выступил с несколькими докладами, после чего его работа стала хорошо известна в профессиональной среде, а метод взят на вооружение. Практическое использование «планетной» тяги поначалу казалось затруднительным из-за высокой чувствительности метода к погрешностям траекторий, но в начале 1965 г. Эллиотт Каттинг и Фрэнсис Стёрмс показали, что с использованием существующей навигационной аппаратуры необходимые точности достижимы.

Майкл Минович и сегодня живет в Лос-Анджелесе и пребывает в полной уверенности, что именно он изобрел метод гравитационного маневра и открыл человечеству доступ к планетам Солнечной системы. Он утверждает, что все его предшественники хоть в чем-нибудь да ошиблись. Вальтер Гоманн (1925) и Гаэтано Крокко (1956) рассматривали вариант посещения одним кораблем нескольких планет, но возмущения от его сближения с планетами, скорее всего, не использовали и пытались компенсировать либо включениями бортовых двигателей, либо взаимно. Фридрих Цандер, зная об изменении энергии КА при пролете у планеты, оставался якобы «в плену» гоманновских траекторий. Дерек Лауден (1954) вычислял приращение скорости от пролета планеты, но не указывал на возможность его использования. (Ознакомившись с этими претензиями, мы не были удивлены, узнав,

что Минович является держателем целого ряда патентов.) О работах советских специалистов, выполненных в конце 1950-х гг., и о полете «Луны-3» он «благоразумно» не упоминает.

Если уж говорить о предшественниках, то нужно заметить, что работа Ф. А. Цандера «Перелеты на другие планеты (Теория межпланетных путешествий)», написанная в 1925–1929 гг., была впервые опубликована на русском языке в 1961 г. – воспользоваться ею американец не мог. Но при внимательном прочтении видно, что Цандер использовал тот же принцип суммирования вектора планетоцентрической скорости K_A и скорости самой планеты, что и Минович, вычислял изменение энергии и гелиоцентрической скорости после пролета, считал приращение скорости в результате гравитационного маневра важным ресурсом, оценивал соответствующую ему экономию топлива и поставил вопрос о вычислении максимально возможного удаления корабля от Солнца в результате пролета планеты. Единственное, что Цандер не сделал, – это не направил свой корабль после гравитационного маневра к другой планете.

«Большой тур» начинается

Второй и последний отчет Майкл Минович выпустил в феврале 1965 г. – он был посвящен использованию гравитационного поля Юпитера для полетов к дальним планетам, выхода из плоскости эклиптики и отправки зонда в окрестности Солнца. Все эти идеи были реализованы в период со второй половины 1970-х до начала 1990-х гг.

Автор указывал на возможность перелета по трассе Земля – Юпитер – Сатурн в 1976 г. и Земля – Юпитер – Плутон в 1977 г. с продолжительностью полета до Плутона всего в семь лет. Один из представленных в отчете вариантов предусматривал запуск КА 8 сентября 1977 г. с возможностью дальнейшего полета от Юпитера к Сатурну. Расчет этой траектории, однако, закончен не был: в распоряжении Миновича не было эфемерид планет на период после 1980 г.

Не был он, кстати, и первым, кто опубликовал предложение о гравитационном маневре у Юпитера: Максвелл Хантер, знакомый с работами Миновича, еще в 1964 г. предложил использовать такой пролет для быстрого достижения внешних планет. А осенью 1965 г. с аналогичной идеей выступил аспирант Калифорнийского технологического института Гэри Фландро, приглашенный в JPL продолжить исследования Майкла Миновича.

Он выполнил расчеты различных вариантов пролета

внешних планет с использованием поля тяготения Юпитера в 1975–1981 гг. Фландро показал, в частности, что при запуске в 1976–1978 гг. можно осуществить последовательный пролет всех четырех внешних планет – Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна – при весьма скромной отлетной скорости. Фландро дал этой поистине головокружительной траектории название *Grand Tour* («Большой тур» или «Великое путешествие»), хотя проекты с таким наименованием уже существовали³. Было ясно, что это уникальная возможность: следующего благоприятного периода для пролета всей четверки больших планет пришлось бы ждать почти 180 лет.

Наибольший интерес к «Большому туру» проявила, что неудивительно, Лаборатория реактивного движения, базирующаяся в Пасадене, в Калифорнии. Уже в декабре 1966 г. руководитель перспективного планирования JPL Хомер Стюарт, говоря современным языком, пропиарил проект «межпланетного бильярда» в журнале *Astronautics & Aeronautics*. Там же освещались дальнейшие этапы работы над проектом.

Детальное изучение траекторий показало, что пуски по трассе «Большого тура» в принципе возможны в период с 1976 по 1980 г. Как установил в 1967 г. Brent Silver из Lockheed Missiles and Space Company, в наибольшей степени

³ Вероятно, первым использовал название *Grand Tour* в космонавтике Стэнли Росс из Lockheed в отчете для Центра Маршалла (июнь 1962 г.), описывающем последовательный пилотируемый облет Марса и Венеры.

траектория зависела от того, на каком расстоянии от Сатурна можно будет пройти. Траектории, проходящие сквозь кольца Сатурна, нельзя было рассматривать всерьез из-за высочайшей вероятности гибели аппарата от столкновения с образующими их частицами. Пролет между нижним краем колец и поверхностью Сатурна, по так называемой внутренней траектории, увеличивал отлетную скорость и сокращал продолжительность маршрута до Нептуна на два-три года по сравнению с пролетом выше колец, но условия в этой области были неизвестны, и навскидку шансы благополучно миновать ее оценивались не более чем в 50 %.

Оптимальное время старта к Юпитеру повторялось с интервалом в 13 месяцев. Почему так? Будем считать орбиты обеих планет круговыми. Земля движется вокруг Солнца с угловой скоростью 1 оборот за год, а Юпитер – 1/12 оборота за год. Разность угловых скоростей составляет 11/12, а значит, одно и то же оптимальное взаимное положение двух планет повторяется через 12/11 года⁴. В реальности обе орбиты немного эллиптические, эллипсы несоосны, а плоскость орбиты Юпитера наклонена на 1,3° к эклиптике. Поэтому оптимальные даты слегка «плавали», а требуемые отлетные скорости заметно отличались. Минимальными они были в 1976 г., а максимальными – в 1980 г.

Разумеется, с каждым годом Сатурн и остальные внешние

⁴ Эта величина называется синодическим периодом обращения Земли относительно Юпитера.

планеты смещались, отставая от Юпитера; отсюда вытекали дополнительные ограничения на условия встреч. Чтобы при пуске в 1976 г. пройти по «внутренней» траектории у Сатурна, нужно было сначала пролететь на высоте всего 1500 км над Юпитером. Опять же, это расценивалось как неприемлемый риск – как физический, в силу неизвестных пока опасностей, так и баллистический – такую точность прицеливания было трудно реализовать. В 1977 и 1978 гг. полеты по «внутренним» траекториям были намного более выгодными. Сходным образом лучшие из «внешних» траекторий получались в 1976 и 1977 гг.; после этого аппарат прошел бы слишком далеко от Юпитера, чтобы изучить его детально.

Дальнейшие уточнения показали, что наиболее благоприятны пуски в 1977 и 1978 гг. по «внутренней» траектории – условные обозначения 1977I и 1978I, а также в 1977 г. по «внешней» траектории 1977E. Их основные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные варианты «Большого тура»

Планета	1977Е	1977I	1978I
Земля	01.09.1977	04.09.1977	09.10.1978
Юпитер	15.07.1979 10,6	28.01.1979 4,0	22.01.1980 9,9
Сатурн	24.08.1981 2,6	30.09.1980 1,06	24.04.1981 1,06
Уран	21.01.1986 5,6	01.02.1984 1,8	28.06.1984 2,0
Нептун	15.08.1989 3,4	08.11.1986 ...	10.02.1987 2,9

Примечание. Второй строкой в ячейках таблицы показано минимальное расстояние до центра соответствующей планеты, выраженное в ее радиусах.

К концу 1960-х уже не было проблемой придумать и рассчитать межпланетную траекторию с гравитационными маневрами, пусть даже очень хитроумную. Намного сложнее и дороже были следующие шаги на пути к реализации проекта. Имеет ли полет по предложенной траектории очевидную ценность? Каким должен быть облик космического аппарата, способного пройти по ней? Какую научную программу он мог бы выполнить и какие приборы нужно для этого сделать и поставить? Какой носитель потребуется для того, чтобы отправить его в долгое путешествие?

Подготовив ответы на вопросы о потенциальной реализуемости проекта, разработчики должны были доказать необ-

ходимость его осуществления, то есть убедить в этом руководство NASA и научное сообщество, которому больше импонировали малые краткосрочные миссии с быстрой отдачей, а затем и правительство, чтобы получить необходимые – и немалые – средства.

В течение нескольких лет было предложено несколько вариантов реализации «Большого тура» и других перспективных проектов изучения дальних планет с аппаратами разного класса и на носителях разной грузоподъемности.

Верхнюю планку возможностей определяла комбинация двух ступеней ракеты «Сатурн V» и третьей ядерной ступени NERVA с тягой 34 тс и удельным импульсом 825 секунд – почти вдвое ббльшим, чем у штатной кислородно-водородной ступени⁵. Вместе они могли отправить в облет Юпитера полезный груз массой 25 т, в то время как обычный «Сатурн V» – лишь примерно 9 т. Для масштаба: самым тяжелым американским межпланетным аппаратом 1970-х гг. был марсианский «Викинг» (Viking) – чуть более 3500 кг.

Центр космических полетов имени Маршалла, головной разработчик «Сатурна V», предлагал космический комплекс исключительной сложности. Он должен был не просто пройти трассу «Большого тура», но дополнить «обязательную

⁵ Удельным импульсом называется сила тяги ракетного двигателя, отнесенная к расходу компонентов топлива. Если тяга измеряется в килограммах силы, а расход – в килограммах массы в секунду, результату по традиции приписывается размерность «секунда». Лучшие химические двигатели на кислороде и водороде имеют удельный импульс около 455 сек.

программу» сбросом зондов в атмосферы Юпитера и Сатурна и выходом отделяемых спутников на орбиты вокруг них, а также отправкой отдельного зонда к Плутону.

«Сатурн V» вышел в 1967 г. на летные испытания. Агентство заказало 15 экземпляров носителя под программу «Аполлон» и в проекте бюджета на 1970 финансовый год (ф.г.) просило средства на начало производства еще трех летных машин, но не было уверено, что их получит⁶. Двигатель NERVA ожидался примерно в 1975 г., а ракетная ступень с ним – к 1978 г., в лучшем случае – к 1977-му. На доводку ядерного двигателя до летного статуса требовалось примерно 600 млн долларов, а на разработку ступени – 500 млн. И затем весь дорогостоящий комплекс «Большого тура» пришлось бы поставить на первую летную ступень со всеми сопутствующими рисками.

В общем, Управление космической науки и приложений NASA не могло открыто отказаться от такой возможности, не внушив законодателям сомнений в необходимости ядерной ступени, но уже в марте 1969 г. сообщило Конгрессу, что «Большой тур» можно реализовать и без нее. И хотя агентство пока не было готово предъявить ни оптимального варианта программы, ни носителя, ни оценки стоимости, заместитель администратора NASA по космической науке Джон Ногл все-таки дал понять, что NASA очень серьезно просчи-

⁶ И не получило.

тывает проекты на базе ракеты «Титан-Центавр»⁷.

Выбор носителя и здесь был непрост, потому что затрагивал межведомственные интересы. Носители семейства «Титан» были созданы по заказу ВВС США для запуска военных аппаратов. NASA намеревалось запустить в 1971 г. два тяжелых межпланетных аппарата с целью мягкой посадки на Марс на своей ракете «Сатурн IV» с дополнительной ступенью «Центавр» (Centaur). Этот проект тоже назывался «Вояджер» и имел несчастливую судьбу: в октябре 1965 г. отменили разработку носителя, а в октябре 1967 г. Конгресс прекратил финансирование марсианского аппарата. Проект возродился год спустя под новым именем «Викинг» и с новым носителем: NASA договорилось с ВВС об установке ступени «Центавр» на военный носитель «Титан IIIД». Правда, стоимость такой комбинации была головокружительной: 43 млн долларов на работы по интеграции и 19 млн за каждый летный экземпляр, в то время как серийный «Атлас-Центавр» обходился в 10 млн, но зато и грузоподъемность при запуске к Марсу с отлетной скоростью около 12 км/с достигала 3700 кг. Новый носитель «Титан-Центавр» получил еще два официальных обозначения – «Титан IIIЕ» и «Титан 23Е».

Джон Ногл обещал принять решение о характере «Большого тура» в августе-сентябре 1969 г., чтобы затребовать

⁷ Оценивались также варианты запуска на более легком носителе «Атлас-Центавр», но с дополнительным разгоном с помощью электроракетной двигательной установки (ДУ) на борту КА.

необходимое финансирование начиная с 1971 ф.г. Он также отметил, что, помимо основной версии с пролетом всех четырех внешних планет, имеется ряд возможностей для посещения только двух или трех – эти сценарии получили название «мини-туры».

25 марта 1969 г. сенаторы заслушали доклад Дональда Харта, директора планетарных программ в управлении Ногла. Он сообщил, что не далее как в январе была найдена очень перспективная траектория Земля – Юпитер – Сатурн – Плутон со стартом в 1977 или 1978 г. продолжительностью полета семь лет. Столь же быстро можно было бы пройти маршрут Земля – Юпитер – Уран – Нептун со стартом между 1978 и 1980 гг.

В мае 1969 г. Рабочая группа по внешним планетам, созданная при Управлении космической науки и приложений NASA, поддержала идею разделить «Большой тур» надвое и исследовать двумя аппаратами все пять дальних планет. Подробное изложение нового сценария сделал Джеймс Лонг из Отдела перспективных проектов Лаборатории реактивного движения JPL в июньском номере *Astronautics & Aeronautics*, а, чтобы все поняли, что проект санкционирован «наверху», NASA оповестило об этой публикации специальным пресс-релизом от 2 июня 1969 г.

Предполагалось, что первый аппарат GT1 стартует в августе 1977 г., минует Юпитер в январе 1979 г. и Сатурн в августе 1980 г., а затем направится к Плутону, которого до-

стигнет в январе 1986 г. При этом «гравитационная роль» Сатурна заключалась главным образом в повороте траектории КА под 25° к плоскости эклиптики – поскольку в момент ожидаемой встречи Плутон находился примерно в 8 а.е. над нею. Дополнительным достоинством сценария, обозначаемого JSP77 – по первым буквам названий исследуемых планет и году старта, был назван безопасный пролет Сатурна выше колец.

Далее аппарат GT2 запускается в ноябре 1979 г. и следует по маршруту JUN79, то есть Юпитер (апрель 1981 г.) – Уран (май 1985 г.) – Нептун (июль 1988 г.), завершая разведку оставшихся планет-гигантов.

За счет разделения задач максимальная продолжительность полета уменьшалась с 12 до 9 лет, что несколько упрощало реализацию. Аппараты запитывались от радиоизотопного генератора. Двигательная установка предлагалась в двух вариантах – на ЖРД или на электроракетных двигателях. Стартовая масса зонда была около 540 кг, в качестве носителя Лонг вновь назвал комбинацию «Титана» с верхней ступенью «Центавр».

Рабочая группа также предложила создать для скорейшего исследования внешних планет более дешевый аппарат класса «Маринер». Созванная в июне 1969 г. конференция ученых из Комиссии по космической науке поддержала эту идею и выдала на-гора план аж из пяти пусков в порядке приоритетов: один старт в 1974 г. для сброса зонда внутрь

Юпитера или для отклонения Юпитером к Солнцу и изучения околосолнечной среды, запуск в 1976 г. с целью создания спутника Юпитера, две миссии «Большого тура», описанные выше, и дополнительная экспедиция к Урану и Нептуну со сбросом зондов в начале 1980-х.

В описываемое время NASA еще не имело опыта создания межпланетных аппаратов с гарантированным сроком активного существования в несколько лет. Нужно было доказать техническую реализуемость проекта с учетом большой продолжительности полета (от 7 до 13 лет в зависимости от сценария). С этой целью в JPL в июле 1968 г. была начата перспективная работа по теме TOPS: Thermoelectric Outer Planets Spacecraft, то есть «Термоэлектрический КА для внешних планет». Она предусматривала подготовку проекта, изготовление и испытание отдельных систем и инженерного макета КА, а также создание системы сертификации для длительных миссий. Сначала проработка велась по основному сценарию «Большого тура», затем – для вариантов JSP и JUN.

В декабре 1968 г. необходимый объем средств на проект TOPS был оценен в 17,5 млн долларов; фактически до декабря 1971 г. был израсходован 21 млн – 7 млн в 1970-м, 10 млн в 1971-м и 4 млн в 1972 ф.г., причем от изготовления инженерного макета по ходу реализации отказались. Предварительный проект TOPS был закончен к маю 1970 г., общее описание аппарата и его подсистем появилось в сен-

тябрьском номере *Astronautics & Aeronautics*, а проект в целом представлен на брифинге для представителей промышленности в сентябре 1971 г.

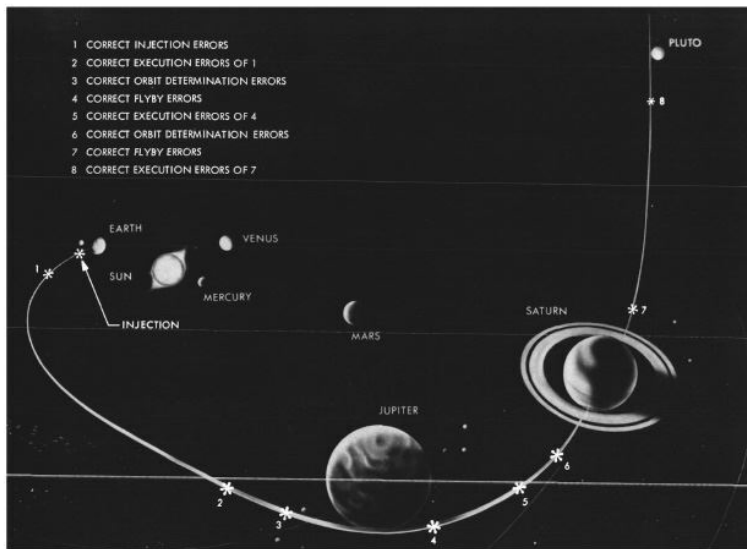


Схема полета «Большого тура» по трассе JSP до Плутона.

NASA Technical Report 32-1571

Проектанты предложили аппарат, питаемый от четырех радиоизотопных генераторов типа MHW-RTG на плутонии-238 суммарной мощностью 550 Вт в начале и 439 Вт после девяти лет использования. Источники питания размеща-

лись на откидной 1,5-метровой штанге, служебная аппаратура экранировалась от их воздействия. Предусматривалась и защита от мощных радиационных полей, ожидавшихся в окрестностях Юпитера. Камеры и другие научные инструменты размещались на поворотной (сканирующей) платформе. Штанга магнитометра и детектора плазмы имела длину 9,1 м. Всего под полезную нагрузку резервировалось 107 кг массы и 115 Вт мощности.

TOPS должен был иметь трехосную систему стабилизации, измерительными устройствами которой были солнечный датчик и датчик Канопуса, используемые на АМС серии «Маринер», а исполнительными – маховики, работающие от электросети КА и требующие лишь минимального расхода гидразина в сеансах разгрузки за счет включения в импульсном режиме двигателей ориентации тягой по 0,23 кгс⁸. Коррекции траектории возлагались на однокомпонентный ЖРД тягой 25 фунтов (11,3 кгс, 110 Н) с запасом топлива, соответствующим суммарному приращению скорости 220 м/с.

Связной радиокomплекс включал командный приемник S-диапазона, передатчики диапазонов S и X с усилителями

⁸ Три маховика управляют угловыми скоростями КА относительно трех осей за счет принудительного изменения собственной скорости вращения. Внешние возмущения, как правило, «устроены» так, что для сохранения стабилизации КА нужно постоянно увеличивать скорость вращения маховиков. Поэтому время от времени их приходится разгружать – снижать скорость, компенсируя возникающий угловой момент с помощью ЖРД. Сейчас такая схема является общепринятой, но в описываемых далее проектах она не нашла себе места.

двух разных типов и четыре антенны: остронаправленную зонтичную диаметром 4,26 м, разворачиваемую после запуска КА и сходную по конструкции с антенной лунного научного комплекса ALSEP, малонаправленную и две ненаправленные. Он обеспечивал передачу от Нептуна, с расстояния 30 а.е., на скорости 2048 бит/с, что позволяло за 11 суток принять на Земле до 400 снимков размером по 5 Мбит каждый. Для промежуточного хранения данных предусматривалось два записывающих устройства на магнитной ленте емкостью по 1 Гбит и буферная память на 64 Мбит. При пролете Юпитера всю информацию можно было передавать в реальном масштабе времени со скоростью 131 072 бит/с.

Как это делается: биты и байты

Бит – это универсальная единица информации с двумя значениями – 1 («да») и 0 («нет»). Один бит в секунду можно передавать даже фототелеграфом: если в данную секунду фонарь дает вспышку, то это единица, а если нет, то ноль. Высокоскоростные оптические линии передачи информации начинают применяться на околоземных КА, но дальний космос пока остается сферой применения радиоканалов. Последовательность передаваемых битов перед отправкой кодируется так, чтобы можно было свести к минимуму ошибки на приемной стороне. До кодирования может также проводиться сжатие информации математическими методами. Лишь на Земле после приема и обработки сигнала данные (например, изображение) могут быть

преобразованы в привычную нам байтовую структуру, по 8 бит в байте, и сохранены в том или ином компьютерном формате.

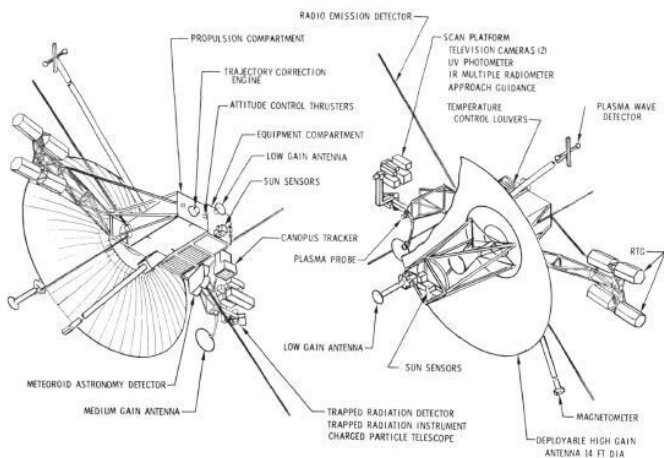
Учитывая продолжительность полета и большое время радиообмена (порядка восьми часов у Нептуна!), аппарат должен был обладать высокой автономностью. Отсюда необходимость установки бортового компьютера. Но что если откажет сам компьютер?

Для решения этой проблемы в JPL уже несколько лет велась разработка управляющей машины STAR⁹ с возможностями самотестирования и самовосстановления. В 1965 г. команда д-ра Альгирдаса Авижениса¹⁰ создала первую работающую модель компьютера типа STAR, а к 1969 г. – собственно компьютер из десяти модулей, способный в течение 0,01 секунды выявить неполадку и выполнить необходимую переконфигурацию. За состоянием модулей по выдаваемым ими диагностическим сообщениям следил специальный тронированный процессор TARP. В виде рабочего макета этот комплекс занимал три стойки в человеческий рост, так что

⁹ Self Test and Repair.

¹⁰ У Джона Дэвиса в «Краткой истории „Вояджера“» (Spaceflight, февраль 1981 г.) он проходил в ошибочном написании Alverez Avizienes. Альгирдас Авиженис родился в 1932 г. в Каунасе (Литва) в семье майора Генерального штаба Антанаса Авижениса, который в 1944 г. ушел на Запад с отступающей германской армией. С 1950 г. Альгирдас жил в США, с 1962 г. работал в Калифорнийском университете в Лос-Анжелесе. В 1980 г. за вклад в создание «Вояджера» был удостоен медали NASA «За исключительные заслуги».

миниатюризация его представляла серьезную проблему.



Один из проектных вариантов TOPS.

NASA Technical Memorandum 33-589

В итоге для TOPS был создан управляющий компьютер CCS – сильно упрощенная версия STAR с сокращенным набором инструкций и лишь с четырьмя процессорами: управляющим, ввода-вывода, логики и прерываний. Память состояла из 12 288 32-битных слов, производительность достигала 28 000 операций в секунду. Компьютер вместе с блоками памяти весил 21 кг.

Носитель для TOPS по заданию представлял собой «Ти-

тан-Центавр» с дополнительной твердотопливной верхней ступенью типа Burner II. Без нее необходимая скорость отлета к Юпитеру не набиралась вообще, но и с нею для спроектированного аппарата массой 821 кг грузоподъемности не хватало, особенно в пусках 1979 г. Разработчикам предстояло искать какой-то компромисс.

Компания Martin Marietta Corp. тем временем прорабатывала зонд для спуска в Юпитер и проведения уникальных исследований в атмосфере планеты-гиганта. При использовании аппарата-носителя TOPS зонд с приборами массой 8,6 кг предстояло отделять на расстоянии 26 млн км от Юпитера. Он входил в атмосферу со скоростью 50 км/с, тормозился и осуществлял спуск на протяжении 2,5 часов до глубины 400 км, где давление в 300 раз превышает земное¹¹.

Увы, столь красивый результат получался только при целевом запуске. Если же TOPS шел по траектории «Большого тура», то после сброса с него на подлете зонд мог погрузиться лишь до отметки 10 атм. Чтобы достичь больших глубин, требовалось значительное усложнение конструкции, но так называемый двухступенчатый зонд получался слишком тяжелым и плохо вписывался в схему гравитационного маневра к Сатурну. В общем, атмосферные зонды лучше было планировать вне программы «Большого тура».

¹¹ В случае установки на аппарат класса «Пионер» атмосферный зонд мог доставить аппаратуру массой 12,3 кг на глубину, соответствующую давлению 72 атм.

Проект «Пионер-F/G»

С самого начала проектных работ по теме «Большой тур» было очевидно, что неразумно отправлять тяжелый дорогостоящий аппарат в многолетнее путешествие со сложным заданием, не имея никакого представления об условиях пути. Нужен был аппарат-разведчик, который пересечет пояс астероидов и исследует обстановку вплоть до орбиты Юпитера. На нем можно было бы также отработать некоторые новые системы и получить опыт связи и управления на больших расстояниях.

Так это обычно описывают сегодня с позиций послезнания, но начиналось все иначе.

Началось все, как это ни парадоксально, с проекта солнечного зонда, подготовленного в июле 1960 г. в Исследовательском центре имени Эймса. В Национальном консультативном комитете по аэронавтике NASA, преобразованном в 1958 г. в NASA, этот центр, расположенный рядом с авиастанцией ВМС США Моффетт-Филд в Калифорнии, между Сан-Франциско и Сан-Хосе, специализировался на авиационных исследованиях, а теперь хотел «застолбить» за собой и долю в быстро развивающейся космической программе.

Группа сотрудников во главе с Чарльзом Холлом предложила совершить разведку ближних окрестностей Солнца – проникнуть на расстояние 0,3 а.е. (45 млн км) от светила

и добыть уникальные научные результаты о состоянии межпланетной и околосолнечной среды. Мощность солнечного излучения в этой области была вдесятеро больше, чем у Земли, и достигала 15 кВт/м^2 , однако инженеры показали, что аппарат конической формы, постоянно ориентированный острым концом на Солнце, способен выдержать нагрев.

Директор Центра Эймса Смит ДеФранс поддержал проект и в сентябре 1960 г. преобразовал неформальный коллектив разработчиков в подразделение с официальным статусом. Однако заручиться поддержкой головного офиса NASA в Вашингтоне оказалось непросто. Лишь в начале 1962 г. Холл встретился с заместителем директора Управления космической науки Эдгаром Кортрайтом, который – вполне ожидаемо – сказал, что молодая команда без реального опыта разработки космических систем взялась за слишком сложную задачу. Он предложил сначала подумать о создании простого аппарата для изучения межпланетной среды без столь опасного приближения к Солнцу.

Технико-экономическое обоснование проекта подготовила за два с половиной месяца – тогда все делалось быстро – компания Space Technology Laboratories (STL) из Редондо-Бич, пригорода Лос-Анджелеса. Результаты были представлены заместителю администратора NASA Роберту Симансу в июне 1962 г., а 9 ноября он подписал документ об утверждении проекта. Кооперация в сущности уже сложилась, но по требованию головного офиса NASA был прове-

ден двухэтапный конкурс, который выиграла STL. В августе 1963 г. ей был выдан предварительный, а в июле 1964 г. – окончательный контракт. В июле 1965 г. STL была преобразована в TRW Systems Group, а 16 декабря 1965 г. стартовал первый из пяти изготавливаемых ею межпланетных зондов.

Проектное название этого КА было «Пионер-А» (Pioneer A). После успешного запуска ему дали имя «Пионер-6», хотя с предыдущими лунными «Пионерами» у него не было ничего общего, а с «Пионером-5», исследовавшим в марте – июне 1960 г. пространство между орбитами Земли и Венеры, новый зонд состоял разве что в идейном родстве. Следующие аппараты с буквенными индексами от В до Е запускались ежегодно с 1966 по 1969 г. Три стартовали удачно и получили названия от «Пионера-7» до «Пионера-9»; последний аппарат серии, собранный ради экономии средств из запчастей, погиб из-за отказа навигационной системы ракеты-носителя.

Согласно проекту, гарантированное время работы каждого аппарата составляло шесть месяцев. В самых смелых мечтах команда Чарльза Холла не могла себе представить, сколько они проработают на самом деле! На протяжении многих лет четыре цилиндрических, стабилизированных вращением «Пионера» передавали информацию о состоянии межпланетной среды на расстояниях от 0,75 до 1,12 а.е. от Солнца. Бортовые приборы сообщали о силе межпланетного магнитного поля, об ионах и электронах солнечного вет-

ра, о плотности электронной плазмы, о солнечных и галактических космических лучах. «Пионер-9» вышел из строя в 1983 г. Эпизодические контакты с тремя остальными аппаратами осуществлялись до 31 марта 1997 г., а последний сеанс связи с «Пионером-6» состоялся 8 декабря 2000 г., через 35 лет после запуска!

Отличная работа первых аппаратов серии свидетельствовала о хорошей продуманности проекта и качественной реализации. Появилось желание расширить зону исследования межпланетных «Пионеров», причем как во внутреннем направлении, то есть к орбите Меркурия и даже ближе к Солнцу, так и в наружном – до орбиты Юпитера.

Первую заявку на развитие проекта NASA сделало в проекте бюджета на 1969 ф.г.¹², представленном в Конгресс 29 января 1968 г. Два новых аппарата, уже тогда получившие обозначения «Пионер-F» и «Пионер-G», должны были совершить полет «за орбиту Марса, через пояс астероидов и к орбите Юпитера». В качестве научных задач были названы определение «градиента влияния Солнца на межпланетное пространство и проникновения галактического космического излучения в Солнечную систему». Запустить их планировалось в 1973–1974 гг.

Подчеркнем, что новые «Пионеры» сначала не предназначались для изучения Юпитера, а тем более Сатурна. NASA надеялось лишь выполнить облет планеты с гравитационным

¹² Он начинался 1 июля 1968 г.

маневром и достичь за счет этого еще больших расстояний от Солнца. Совершая полет на спаде солнечной активности и в период ее минимума, эти зонды могли бы, как верили тогда ученые, «изучить положение границы между солнечной короной и межзвездной средой». Буквально этими словами Джон Ногл обосновывал сроки стартов на слушаниях в Конгрессе 19 февраля 1968 г. Говоря современным языком, речь шла о гелиопаузе – границе областей господства солнечного ветра и межзвездного вещества. Тогда ученые всерьез полагали, что она может находиться сразу за орбитой Юпитера или даже перед нею, и если это так, то «Пионеры» могли бы первыми проникнуть в межзвездную среду.

Конгресс в законе о разрешении финансирования одобрил проект «Пионер-F/G», и 20 августа 1968 г. Исследовательскому центру имени Эймса было предписано начать работу. Подрядчиком вновь стала фирма TRW Systems – уже в октябре она представила в Центр Эймса аванпроект нового зонда-разведчика по теме «Пионер-Юпитер». Внешне он был не очень похож на те, что стартовали в действительности, – достаточно сказать, что в основном варианте питание предполагалось от шести больших панелей солнечных батарей. А вот носители, годы старта и траектории выбрали уже тогда.

В январе 1969 г. в составе проекта бюджета на 1970 ф.г. впервые были запрошены средства на создание двух КА в рамках общей программы «Пионер». Теперь уже достиже-

ние Юпитера значилось официальной целью нового проекта, как и оценка потенциальных угроз для «Большого тура». Предстояло измерить свойства заряженных частиц, магнитных полей и радиоизлучения вблизи Юпитера. На основании этих данных можно было изучить состав и динамику атмосферы планеты и ее взаимодействие с межпланетной средой, а также проанализировать тепловой баланс Юпитера и разобраться с источником его внутренней энергии. Однако еще только рассматривалась возможность поставить на «Пионеры» какую-нибудь телевизионную систему для съемки планеты¹³.

Теперь два старта планировались в 1972 и 1973 гг. Аппараты проектировали под носитель «Атлас-Центавр» с дополнительной третьей ступенью, однако NASA намеревалось отправить первый из них на ракете «Титан-Центавр», чтобы испытать ее перед двумя запусками «Викингов» к Марсу весной 1973 г.

Тогда же и в рамках той же программы у Конгресса запросили деньги на совместный межпланетный проект Западной Германии и США под названием «Гелиос» (Helios) с той самой целью, с которой все началось: измерить свойства космической среды вплоть до дистанции 0,3 а.е. от Солнца. Роль головного разработчика взяла на себя ФРГ, которая в основ-

¹³ В феврале 1970 г. стало известно, что на эту роль выбран фотополариметр, разрабатываемый Аризонским университетом совместно с Исследовательским центром в Санта-Барбаре.

ном и финансировала два новых солнечных зонда, а США поставляли часть научной аппаратуры и обеспечивали запуски в 1974 и 1975 гг.

Средств на новые «Пионеры» и на приборы для «Гелиосов» требовалось немного, так что Конгресс не стал упрямяться и деньги выделил. Проект отправки двух «Пионеров» к Юпитеру был утвержден руководством NASA 8 февраля 1969 г. Руководили работами те же люди, что и отвечали за создание зондов предыдущей серии. Менеджером проекта остался Чарльз Холл, глава специального проектного отдела Центра Эймса. Разработку служебного борта вел Ральф Холтцклау, а комплекса научной аппаратуры – Джозеф Лепетич. Роль научного руководителя проекта взял на себя д-р Джон Вулф, он же – руководитель эксперимента по изучению солнечного ветра.

Контракт на разработку, изготовление, испытания и поставку двух одинаковых КА общей стоимостью 38 млн долларов был выдан 11 февраля 1970 г. компании TRW Systems. На фирме проект вел Бернард О'Брайен.

В январе 1970 г. старты «Викингов» были отложены с весны 1973-го на лето 1975 г. Как следствие, отпала необходимость в испытательном пуске ракеты «Титан-Центавр» в 1972 г.¹⁴, и единственным носителем «Пионеров» остал-

¹⁴ Первый «Титан-Центавр» улетел в феврале 1974 г. с динамическим макетом марсианского КА «Викинг» и потерпел аварию. Остальные шесть ракет этого типа стартовали успешно.

ся «Атлас-Центавр» компании General Dynamics/Convair с дополнительным разгонным блоком TE-M-364-4. Фактически это была верхняя ступень от ракеты «Дельта» с твердотопливным двигателем тягой 6800 кгс от фирмы Thiokol Chemical Company. Эта комбинация обеспечивала для аппарата стартовой массой 258 кг при прямом выведении (без промежуточной опорной орбиты) отлетную скорость 14,5 км/с и достижение Юпитера через 600–750 суток.

Чтобы зонд влез под головной обтекатель диаметром 3,05 м, параболическую остронаправленную антенну высокого усиления HGA¹⁵ сделали диаметром 2,74 м. В частотном диапазоне S она имела коэффициент усиления 33 дБ¹⁶ при ширине луча 3,3°. Над ее чашей на трехногой опоре на высоту 1,2 м была вынесена рупорная антенна среднего усиления MGA, дающая 12 дБ усиления в луче шириной 32°. Высота аппарата от кольца адаптера для установки на третьей ступени ракеты-носителя (РН) и до антенны MGA составила 2,9 м.

Корпус станции был выполнен в виде шестиугольной призмы высотой 0,36 м и диаметром описанной окружности 1,42 м – стороны соответственно были по 0,71 м, то есть ровно по одному аршину в ширину. С одного бока к кор-

¹⁵ High Gain Antenna. Далее соответственно Medium Gain Antenna и Low Gain Antenna.

¹⁶ Грубо говоря, в 2000 раз. Позже мы обсудим это подробнее, а пока лишь заметим, что усиление обеспечивалось в узком луче за счет практически полного отсутствия сигнала за его пределами.

пусу крепился контейнер с научной аппаратурой, тоже шестиугольный, толщиной 0,49 м, с другого – блок оптических датчиков космической пыли. Между корпусом и антенной HGA располагалась третья антенна – всенаправленная низкого усиления LGA (5 дБ).

В проекте «Пионер-F/G» впервые в практике автоматических межпланетных КА был применен радиоизотопный источник питания. Как известно, мощность, приходящая от Солнца на единицу площади, ослабевает как квадрат расстояния, и уже у Юпитера она в 26 раз меньше, чем у Земли. Сейчас существуют высокоэффективные фотоэлементы, способные давать достаточное питание на таком расстоянии от светила. В начале 1970-х это еще было фантастикой.



«Пионер-10» у Юпитера в представлении художника.

NASA/Ames Research Center, Rick Guidice, 1972

Поэтому аппарат был запитан от радиоизотопных генераторов SNAP-19 на плутонии-238, изготовленных компанией Teledyne Isotopes из топливных дисков Лос-Аламосской лаборатории и оснащенных термоэлектрическими преобразователями. Четыре таких генератора вместе выдавали 155 Вт электрической мощности при запуске и 140 Вт к моменту достижения Юпитера. Для питания систем КА было нужно 100 Вт, для научной аппаратуры – еще 26 Вт. Избытком мощности заряжали серебряно-кадмиевую аккумуляторную батарею либо излучали его через шунт-радиатор. Бортовая

сеть работала при напряжении 28 В.

Чтобы генераторы создавали как можно меньше помех научной аппаратуре, их установили попарно на концах двух ферменных штанг, отводимых в сторону от корпуса на 2,7 м. На третьей штанге длиной 5,2 м разместили датчик магнитометра, так что он отстоял на 6,6 м от оси. Таким образом, аппарат был не вполне симметричен, и ось вращения его отстояла от оси антенны HGA примерно на 20 см.

Как это работает: Радиоизотопный генератор

Радиоизотопный генератор содержит искусственно созданный нестабильный изотоп, медленный распад которого сопровождается выделением тепловой энергии. Как правило, это тепло преобразуется в электроэнергию с помощью нагреваемых термопар: этот процесс имеет невысокий КПД, зато реализуется без каких-либо движущихся частей, то есть весьма надежно. В англоязычной литературе такая комбинация источника и преобразователя называется RTG, в публикациях на русском языке она получила более содержательную аббревиатуру – РИТЭГ.

В качестве активного изотопа почти всегда используется ^{238}Pu (плутоний-238) в виде двуокиси плутония. Он самопроизвольно превращается в уран-234, испуская альфа-частицу с энергией 5,6 МэВ. Число распадов таково, что 1 г свежего плутония-238 дает примерно 0,567 Вт тепловой мощности. Необходимое количество изотопа несложно оценить, зная, что каждый из четырех генераторов

«Пионеров» имел начальную тепловую мощность 650 Вт и электрическую – около 39 Вт. Избыток тепла сбрасывался излучением через шесть плоских радиаторов.

Период полураспада ^{238}Pu составляет 87,7 года, то есть за это время количество распадов и тепловая мощность генератора, снижаясь по экспоненте, сократятся вдвое. Электрическая мощность падает быстрее, так как термоэмиссионный преобразователь со временем также теряет свои характеристики.

Система терморегулирования обеспечивала температуру от -23° до $+38^{\circ}\text{C}$ в контейнере научной аппаратуры и необходимый подогрев компонентов, расположенных вне его. Исполнительными органами системы были термочувствительные жалюзи на нижнем днище корпуса, открываемые биметаллическими пружинами, электрические нагреватели и 12 одноваттных радиоизотопных нагревателей, постоянно поддерживающих тепловой режим клапанов двигателей, солнечного датчика и магнитометра. Корпус аппарата был «укутан» в многослойную экранно-вакуумную теплоизоляцию.

Система ориентации и стабилизации включала датчик звезды Канопус и два солнечных датчика в качестве измерительных средств, а также ЖРД на каталитически разлагаемом гидразине в качестве исполнительных органов – два

двигателя SCT¹⁷ для изменения скорости вращения и четыре VPT¹⁸ для управляемой прецессии оси вращения и коррекций траектории. Двигатели были скомпонованы в три блока и размещены под вырезами на периферии антенны HGA. Два сопла (VPT 2 и 4) смотрели вдоль оси КА вниз, два (VPT 1 и 3) – вверх и два (SCT 1 и 2) – по касательной к окружности антенны в противоположные стороны. Двигатели могли работать поодиночке и попарно в непрерывном или импульсном режиме, развивая тягу от 0,52 до 0,24 кгс в зависимости от давления подачи топлива. Сферический бак управлялся 27,2 кг гидразина и наддувался азотом.

Аппарат стабилизировался вращением с таким расчетом, чтобы антенна HGA была направлена в сторону Земли с отклонением не более $0,8^\circ$. Автоматическое наведение на Землю обеспечивала система конического сканирования CONSCAN. Облучатель антенны HGA мог принимать два положения: штатное осевое и со смещением, соответствующим отклонению основного лепестка диаграммы направленности на 1° от оси. Во втором случае мощность принимаемого с Земли сигнала модулировалась вращением аппарата. В соответствии с его амплитудой специальный бортовой процессор формировал раз в три оборота команды на кратковременное включение двигателей для разворота оси вращения в направлении Земли. Ось антенны MGA имела посто-

¹⁷ Spin Control Thruster.

¹⁸ Velocity and Precession Thruster.

янное отклонение 9° от этой оси.

Никакого компьютера на борту не предусматривалось. В принципе бортовые ЭВМ к моменту создания КА «Пионер-F/G» уже существовали, но они были еще слишком велики и тяжелы. Отсутствие компьютера влекло необходимость выдачи с Земли большого количества команд, и в основном в реальном времени. Если, конечно, можно применить такой термин к условиям радиообмена с Юпитером, когда нужно примерно 45 минут, чтобы сигнал дошел «туда», и еще 45, чтобы вернулся «обратно».

Радиосистема включала, помимо трех упомянутых антенн, два передатчика мощностью 8 Вт на лампах бегущей волны и два приемника. Аппарату F выделили в S-диапазоне литер частоты 6, что соответствовало передаче на частоте 2292,037 МГц и приему на 2110,584 МГц, а аппарату G – литер 7 (2292,407 и 2110,925 МГц). Любой передатчик можно было подключить к антенне HGA либо к паре MGA/LGA.

Блок цифровой телеметрии мог готовить данные в 11 разных форматах для передачи на Землю со скоростью от 16 до 2048 бит/с, в том числе с конволюционным кодированием и с возможностью выявления и коррекции сбойных битов. Самая высокая скорость предназначалась для начального этапа полета при приеме на Земле на 26-метровую антенну. Прием от Юпитера планировался уже на 64-метровые антенны со скоростью 512 бит/с для некодированного сигнала или 1024 бит/с при использовании конволюционного коди-

рования.

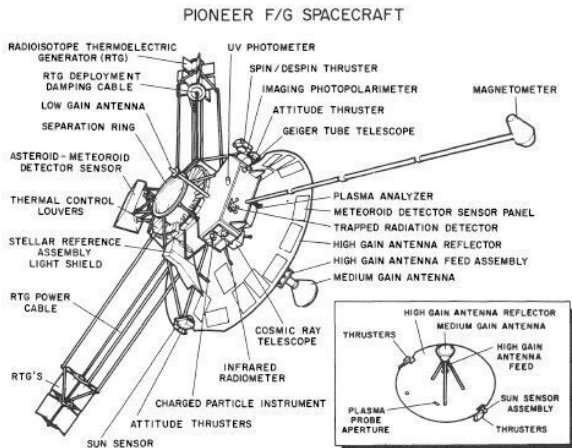
Для временного хранения информации на борту служило запоминающее устройство DSU¹⁹ на ферритовых сердечниках емкостью 49 152 бит, или, если угодно, шесть килобайт. (Вдумайтесь в эти числа – в начале 2000-х гг., в дни, когда аппараты мультиспектрального зондирования уже оснащались запоминающими устройствами емкостью в десятки гигабит, жил, работал и вел передачи с расстояния 12 млрд км аппарат, имеющий в миллионы раз меньшую память!)

По командной радиолинии теоретически можно было передать 255 разных команд, из которых лишь 222 были нужны в реальности: 149 предназначались для управления системами КА и 73 для научной аппаратуры. Два декодера и блок распределения команд определяли достоверность каждой посылки и ее адресата. Так как команда состояла из 22 бит и передавалась со скоростью 1 бит/с, на ее прием на борту требовалось 22 секунды. Аппарат имел программную память на целых пять команд (!), которые могли быть выполнены друг за другом с заданными временными интервалами. Вот с такими средствами NASA в первый раз отправилось штурмовать Юпитер...

Чтобы обеспечить работу КА в течение 24 месяцев, разработчики максимально упростили борт за счет усложнения наземной части. Общий принцип проектирования состоял в том, чтобы никакой единичный отказ не был катастрофич-

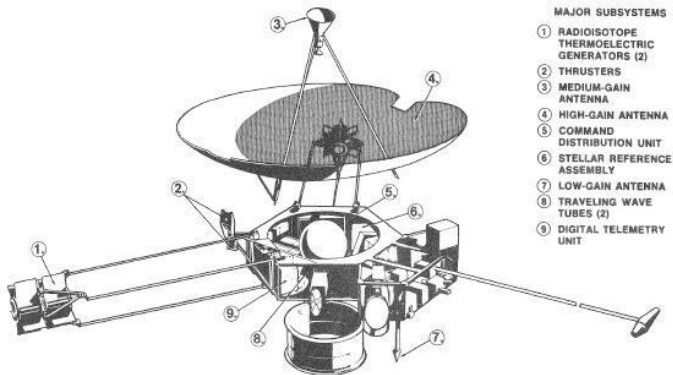
¹⁹ Data Storage Unit.

ным для выполнения полетного задания. Главные компоненты задублировали, остальные ставили на борт только при наличии опыта использования в космосе. Электронные компоненты подвергли предварительной отработке на Земле, чтобы избежать ранних отказов.



КА «Пионер F/G». Общий вид.

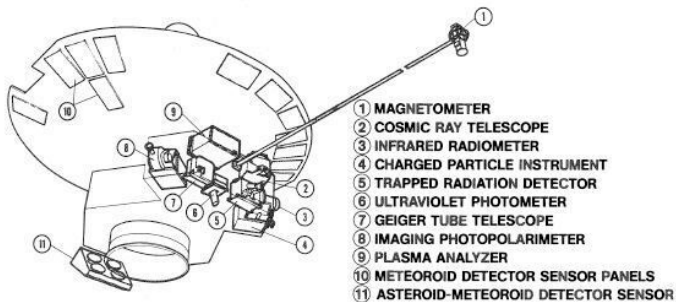
Пресс-релиз NASA HQ72-25



- MAJOR SUBSYSTEMS**
- ① RADIOISOTOPE THERMOELECTRIC GENERATORS (2)
 - ② THRUSTERS
 - ③ MEDIUM-GAIN ANTENNA
 - ④ HIGH-GAIN ANTENNA
 - ⑤ COMMAND DISTRIBUTION UNIT
 - ⑥ STELLAR REFERENCE ASSEMBLY
 - ⑦ LOW-GAIN ANTENNA
 - ⑧ TRAVELING WAVE TUBES (2)
 - ⑨ DIGITAL TELEMETRY UNIT

КА «Пионер-F/G». Основные подсистемы.

Пресс-релиз NASA HQ72-25



- ① MAGNETOMETER
- ② COSMIC RAY TELESCOPE
- ③ INFRARED RADIOMETER
- ④ CHARGED PARTICLE INSTRUMENT
- ⑤ TRAPPED RADIATION DETECTOR
- ⑥ ULTRAVIOLET PHOTOMETER
- ⑦ GEIGER TUBE TELESCOPE
- ⑧ IMAGING PHOTOPOLARIMETER
- ⑨ PLASMA ANALYZER
- ⑩ METEOROID DETECTOR SENSOR PANELS
- ⑪ ASTEROID-METEOROID DETECTOR SENSOR

КА «Пионер-F/G». Размещение научной аппаратуры.

Пресс-релиз NASA HQ72-25

Научные задачи «Пионеров» в межпланетном полете включали картирование межпланетного магнитного поля (и поэтому аппараты сделали «магнитно чистыми» в максимальной возможной степени), солнечного ветра и космических лучей местного и галактического происхождения, а также межпланетной пыли. Во время встречи с Юпитером предстояло измерение магнитного поля, исследование радиационных поясов, поиск источников радиоизлучения планеты, измерение температуры и изучение структуры ее атмосферы, съемка самого Юпитера и его спутников.

Из 150 полученных предложений для установки на КА «Пионер-F/G» в марте 1969 г. были выбраны 11 научных инструментов:

1) *видовой фотополариметр* IPP (Imaging Photopolarimeter) для фотометрической и поляризметрической съемки с четырьмя детекторами на два диапазона длин волн (390–500 и 595–720 нм) и две поляризации, способный также формировать цветные изображения Юпитера и его спутников размером примерно 500×500 элементов;

2) *ультрафиолетовый фотометр* UVP (Ultraviolet Photometer) для регистрации рассеяния света атмосферой Юпитера в линиях водорода и гелия (121,6 и 58,4 нм), а также для оценки количества межзвездного нейтрального водорода и гелия, проникающего в гелиосферу извне, и концентрации водорода в межзвездной среде;

3) *инфракрасный радиометр* IRR (Infrared Radiometer) – двухканальный прибор (14–25 и 29–56 мкм) для измерения теплового потока от диска Юпитера и его распределения по поверхности.

4) *анализатор плазмы* PA (Plasma Analyzer) для измерения плотности потока, направления движения и энергии протонов и электронов солнечного ветра. Анализатор высокого разрешения имел 26 каналов с фотоумножителями на диапазон энергий от 0,1 до 8 кэВ. Анализатор среднего разрешения включал пять электрометров для регистрации ионов с энергиями 0,01–18,0 кэВ и электронов 1–500 эВ;

5) *прибор для регистрации заряженных частиц* CPI (Charged Particle Composition Instrument). Два телескопа частиц межпланетной среды были рассчитаны на ионы с энергией 1–500 МэВ, протоны от 0,4 до 10 МэВ и альфа-частицы. Два датчика захваченных частиц радиационных поясов Юпитера были представлены твердотельной ионной камерой для регистрации электронов от 3 МэВ и детектором протонов с энергией выше 30 МэВ на основе ториевой фольги;

6) *телескоп космических лучей* CRT (Cosmic Ray Telescope) для регистрации энергетического спектра частиц солнечного и галактического происхождения имел в своем составе два твердотельных телескопа на диапазоны энергий протонов 56–800 МэВ и 3–22 МэВ и третий, измеряющий поток электронов от 0,05 до 1,0 МэВ и протонов от 0,05 до 20 МэВ;

7) *гейгеровский телескоп* GTT (Geiger Tube Telescope) объединял в своем составе семь датчиков на трубках Гейгера – Мюллера для регистрации потока, энергетического спектра и углового распределения протонов и электронов радиационных поясов с энергиями выше 5 МэВ и от 2 до 50 МэВ соответственно, а также электронов низких энергий (от 40 кэВ);

8) *детектор электронов и протонов радиационных поясов Юпитера* TRD (Trapped Radiation Detector) – прибор аналогичного назначения, включавший расфокусированный черенковский счетчик электронов высоких энергий (0,5–12 МэВ), детектор электронов низких энергий (100–400 кэВ) и три устройства для дискриминации электронов и протонов: всенаправленный счетчик на твердотельном диоде (частицы до 3 МэВ, протоны 50–350 МэВ) и два сцинтилляционных детектора, позволяющие отличить электроны с энергиями до 5 кэВ от протонов до 50 кэВ;

9) *гелиевый векторный магнитометр* HVM (Helium Vector Magnetometer) для измерения трех компонент межпланетного магнитного поля в пределах от 0,01 до 140 000 нТл, то есть до 1,4 Гс²⁰;

10) *детектор астероидных и метеороидных частиц* AMD (Asteroid-Meteoroid Detector# – блок из четырех фо-

²⁰ Тесла – единица индукции магнитного поля в системе SI. На практике используется дробная единица нанотесла (10^{-9} Тл), также называемая гамма, и гаусс из системы CGS, равный 10^{-4} Тл.

тометров, каждый с 20-сантиметровым основным зеркалом и полем зрения 8° , для регистрации объектов размером от астероида до пылинки и определения расстояний до них и скоростей движения;

11) *детектор метеороидных частиц* MD (Meteoroid Detector) использовал 13 панелей размером 15×30 см, которые в сумме занимали площадь $0,605 \text{ м}^2$ на задней стороне остронаправленной антенны. Каждая панель состояла из 18 ячеек, заполненных аргоном и азотом, так что всего их было 234. Попадание частицы массой от 10^{-9} г и выше фиксировалось по пробою стальной мембраны толщиной 25 мкм, а скорость падения давления указывала на ее массу.

Масса научной аппаратуры составила 30 кг. Большая ее часть размещалась в специальном боковом отсеке в нижней части корпуса, за исключением двух датчиков микрометеоритов, анализатора плазмы и телескопа космических лучей. Два эксперимента проводились вообще без размещения специальных приборов на борту – определение массы Юпитера и четырех галилеевых спутников по траекторным измерениям и радиопросвечивание атмосфер Юпитера и Ио сигналом бортового передатчика.

Таблица 3. Состав научной аппаратуры КА «Пионер-F/G»

Прибор	Масса, кг	Энергопотребление, Вт
Видовой фотополариметр IPP Томас Герелс, Аризонский университет	4,3	2,2
Ультрафиолетовый фотометр UVP Даррелл Джадж, Южно-Каролинский университет	0,7	0,7
Инфракрасный радиометр IRR Гвидо Мюнх, Калифорнийский технологический институт	2,0	1,3
Анализатор плазмы РА Джон Вулф, Центр Эймса	5,5	4,0
Прибор для регистрации заряженных частиц CPI Джон Симпсон, Чикагский университет	3,0	2,4
Телескоп космических лучей CRT Фрэнк МакДональд, Центр Годдарда	3,2	2,2
Гейгеровский телескоп GTT Джеймс Ван Аллен, Айовский университет	1,6	0,7
Детектор электронов и протонов радиационных поясов Юпитера TRD Уолкер Филлиус, Калифорнийский университет в Сан-Диего	1,7	2,9
Гелиевый векторный магнитометр HVM Эдвард Смит, Лаборатория реактивного движения	2,6	5,0
Детектор астероидных и метеороидных частиц AMD Роберт Соберман, General Electric Co.	3,3	2,2
Детектор метеороидных частиц MD Уильям Кинард, Центр Лэнгли	1,7	0,7
Небесная механика Джон Андерсон, Лаборатория реактивного движения	–	–
Радиопросвечивание Арвидас Клиоре, Лаборатория реактивного движения	–	–
Всего	29,6	24,3

Примечание. Второй строкой назван научный руководитель соответствующего инструмента.

Стоимость двух летных зондов вместе с научной аппаратурой и обработкой данных была оценена в 100 млн долларов. В эту сумму входило также изготовление до конца 1970 г. одного технологического аппарата для наземных испытаний. Носители, запуски и услуги по управлению и приему информации Сетью дальней связи DSN оплачивались отдельно.

Сеть DSN²¹ находилась в подчинении Лаборатории реактивного движения и обеспечивала полет аппаратов «Пионер-F/G» по соглашению с Центром Эймса. Для этого использовались антенны и аппаратура обработки трех комплексов дальней связи в Калифорнии, Австралии и Испании, одна из антенн в Южно-Африканской Республике²² и некоторые привлеченные средства.

²¹ Deep Space Network.

²² До 1 июля 1974 г.

Глава 2

Первое путешествие к царю планет

Через пояс астероидов

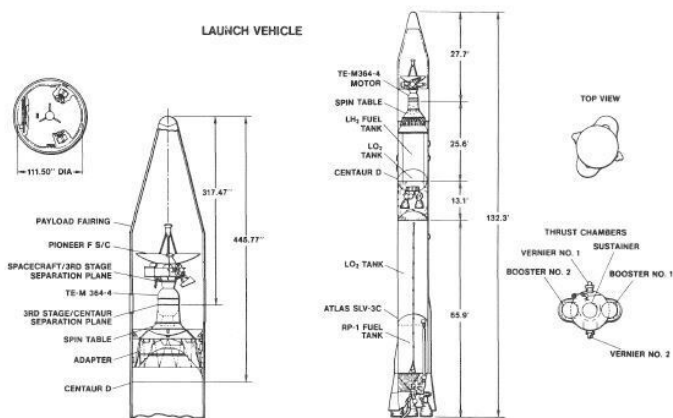
Старты двух «Пионеров» спланировали с годовым интервалом. Первое астрономическое окно, определяемое движением Земли относительно Юпитера, продолжалось с 27 февраля по 13 марта 1972 г. Этим датам старта соответствовали встречи с планетой в период с 21 ноября 1973 г. по 27 июля 1974 г.

Ракету «Атлас-Центавр» номер АС-27 собрали на стартовой площадке LC-36А мыса Кеннеди²³ 22 декабря 1971 г. Аппарат привезли на космодром 15 января спецсамолетом MiniGuppy, протестировали в монтажно-испытательном корпусе AD, заправили, состыковали с разгонным блоком и укрыли обтекателем, после чего доставили на старт и в середине февраля установили на носитель. 22 февраля подвели итог испытаниям и назначили пуск на 27 февраля. Накануне старта, чтобы свести к минимуму облучение персонала и сооружений стартового комплекса, изделие оснастили РИТЭ-Гаами. Стартовая масса ракеты космического назначения бы-

²³ Официальное наименование мыса Канаверал в 1964–1973 гг.

ла 146 673 кг при высоте 40,3 м.

Пуск назначили на 27 февраля в 20:52 EST²⁴, однако в этот вечер в 19:31 из-за грозы обесточило весь комплекс LC-36. Попытка восстановить питание в 19:43 была безуспешной. На проверку состояния ракеты после сбоя было нужно от часа до двух, ветер на больших высотах все равно был вне допуска, и в 20:01 старт отменили.



Размещение КА «Пионер F/G» и разгонного блока
на ракете «Атлас-Центавр».

Пресс-релиз NASA HQ72-25

²⁴ Восточное стандартное время. Все полетные события привязываются ко Всемирному координированному времени UTC (Universal Time Coordinated) по бортовым часам КА, но то, что происходит на Земле, бывает удобнее датировать по местному времени.

Вторая попытка пуска вечером 28 февраля сорвалась опять же из-за ветров и проблемы с перезакладкой программы полета носителя. На 29 февраля с мыса Кеннеди планировался пуск военного аппарата DSP F3, так что високосный день пришлось пропустить. Этот спутник запустили 1 марта, что позволило начать третий отсчет к старту «Пионера». Но и этим вечером пуск к Юпитеру не состоялся: ответственные организации не успели проверить программу выведения. Успехом увенчалась лишь четвертая попытка, хотя и с опозданием на 24 минуты из-за ложного показания датчика наземной системы обеспечения.



Предстартовая подготовка «Пионера-10» на мысе Кеннеди.

NASA/Ames Research Center, 1972

Пуск КА «Пионер-Ф» был произведен 2 марта 1972 г.
в 20:49:03,575 EST, что соответствовало 3 марта в 01:49:04

UTC. Через 935 секунд после старта, набрав скорость 14 356 м/с в системе отсчета, связанной с центром Земли²⁵, станция отделилась от третьей твердотопливной ступени и получила официальное имя «Пионер-10» (Pioneer 10).

²⁵ Эта оговорка важна потому, что к скорости, набранной ракетой по отношению к стартовому комплексу (по проекту – 13 913 м/с), добавилась линейная скорость вращения Земли.



Ракета «Атлас-Центавр» на старте. Февраль 1972 г.

NASA/Ames Research Center, 1972

Через 26 минут после старта в сеансе через 26-метровую антенну DSS-51 в Южной Африке на борт ушла команда активации записанной программы операций. Включени-

ем на 56 секунд тормозного двигателя SCT 1 аппарат замедлил свое вращение с 53 до 20 об/мин, а развертывание двух штанг с РИТЭГами снизило его угловую скорость до штатных 4,8 об/мин. После этого расचेковали и развернули штангу магнитометра. Среди других событий первого сеанса можно отметить включение первых приборов – магнитометра, детектора метеоритной пыли и инструментов TRD, GTT и CPI для регистрации частиц.

Полетом «Пионера-10» управляли специалисты Центра Эймса при баллистической поддержке JPL с использованием станций Сети дальней связи DSN, обозначенных буквами DSS с числовым индексом. Именно на них принималась информация с борта и оттуда же выдавались команды.

Руководителем полета был сначала Роберт Нунамейкер, затем его сменил Норман Мартин. За траекторный анализ отвечал Роберт Хофстеттер, за служебные системы – Гилберт Шрёдер, за функционирование научной аппаратуры – Ричард Фиммел.

Отлетная скорость аппарата настолько превышала скорость освобождения, что всего через одиннадцать часов после старта он вышел за пределы орбиты Луны, и даже «на бесконечности» осталось около 9200 м/с. Траектория полета к Юпитеру представляла собой дугу гелиоцентрической орбиты со следующими параметрами:

- наклонение – $2,08^\circ$;
- перигелий – 0,991 а.е. (148,3 млн км);

● афелий – 5,857 а.е. (876,2 млн км);

● период обращения – 2314 суток (6,34 года).

Программа экспедиции предусматривала облет Юпитера в «прямом» направлении на расстоянии от его центра в 2,85 радиуса планеты, то есть около 203 000 км, чтобы вблизи перицентра угловая скорость аппарата была близка к скорости вращения самого Юпитера. Так называемый режим коротации позволял в течение длительного времени наблюдать ту сторону планеты, где находилось таинственное Большое Красное Пятно. «Официально» оно было открыто и описано за 95 лет до этого, но на самом деле еще в 1664–1665 гг. его наблюдали Роберт Гук и Жан-Доминик Кассини. Уже более 300 лет, сначала с перерывами, а потом и постоянно оно фиксировалось над 22° ю.ш. Юпитера. Что самое поразительное, немного смещаясь по долготе туда и обратно с трехмесячным периодом, в итоге пятно обращалось чуточку медленнее, чем соседние детали поверхности, и за 200 лет отстало от них на три оборота.

Ученые хотели провести «Пионер-10» не только позади Юпитера (это как раз получалось почти автоматически), но и позади его спутника Ио – в надежде обнаружить ионосферу последнего путем радиопросвечивания. В случае прохождения точно по диаметру Ио радиосигнал должен был прерваться на 91 секунду. Что называется, сравните масштабы: диаметр спутника был чуть более 3600 км, чуть больше нашей Луны, а расчетное расстояние до него в момент захода

составляло 531 700 км.

Наконец, нужно было учесть оперативные соображения: критическая фаза пролета в пределах от трех радиусов планеты и ближе планировались в пятичасовой период одновременной видимости Юпитера с двух наземных станций в Голдстоуне (Калифорния) и Канберре (Австралия). Если бы на прием работал только один пункт, какой-нибудь сбой привел бы к потере бесценной информации. Две одновременно работающие станции страховали друг друга, сводя вероятность неудачи к минимуму.

Все эти требования в сумме задавали и конкретную точку прицеливания (справа от диска Юпитера, если смотреть с Земли), и точную дату и время пролета – 4 декабря 1973 г. в 02:26 UTC по бортовому времени КА. Земле предстояло отслеживать происходящее с задержкой на время прохождения радиосигнала – 45 мин 54 с для расстояния между Юпитером и Землей в день прилета.

Стоит еще раз напомнить, что точка прицеливания – это отнюдь не высота пролета над планетой. Точка прицеливания – это идеальное понятие, место пересечения асимптоты подлетной ветви гиперболической орбиты КА относительно Юпитера и так называемой В-плоскости, которая перпендикулярна этой асимптоте и проходит через центр планеты. Расстояние между точкой прицеливания и центром планеты – это прицельная дальность. В реальности аппарат пересечет названную плоскость ближе к Юпитеру, поскольку тяго-

тение планеты искривляет траекторию полета, а в периферии, лежащем уже за этой плоскостью, окажется еще ближе. В баллистических расчетах при планировании маневров фигурировала точка прицеливания и ее ожидаемое смещение в результате коррекции траектории. Для прессы, естественно, называли понятный всем параметр – ожидаемую минимальную высоту пролета над вершинами облаков планеты.

5 марта 1972 г. операторы дважды включали на 30 секунд двигатели «Пионера», чтобы оценить их эффективность по доплеровскому изменению частоты радиосигнала. В первый раз двумя хвостовыми ЖРД убавили 1,22 м/с скорости, а через полчаса добавили столько же двумя носовыми. («Носом», то есть антенной HGA, аппарат смотрел примерно в сторону Земли.)

Как это делается: доплеровские измерения

Скорость электромагнитной волны постоянна и не зависит от скоростей источника и приемника, а вот ее частота будет отлична от частоты передатчика, если лучевая скорость – проекция относительной скорости движения на направление до источника – не равна нулю. Это и называется эффектом Доплера.

В первом приближении изменение частоты $\Delta f = f \cdot v/c$, где v – лучевая скорость, f – частота передатчика, c – скорость света. При удалении источника частота снижается так же, как у звуковых сигналов в быту. Поскольку приемник находится на движущейся и вращающейся Земле, а источник – на движущемся КА,

величина Δf

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.