

# НАУКА И ЖИЗНЬ

ISSN 0028-1263

**4** ● Поиск жизни на Марсе – реальная работа землян ● Можно ли считать расточительность мозга эволюционно устаревшей? ● В цивилизованном обществе авторская собственность, как и материальная, охраняется государством ● «Посередине, между большими камнями, Вы увидите... зелёный гранат» ● Сколько стоит человек?



# В Н О М Е Р Е :

Н. ЭЙСМОНТ, докт. физ.-мат. наук, О. БАТАНОВ — «ЭкзоМарс»: от миссии-2016 к миссии-2020 .....	2
Наука и жизнь в начале XX века .....	15
Поддержите библиотеки! .....	16
Бюро научно-технической информации .....	18
Е. САМОХИНА — «Прожигатель» энергии .....	22
А. ПАХОМОВ — Небо в мае — июне 2017 года .....	26
«Добавки» на канале «Наука» .....	33
М. МАКАРОВА — Авторское право и интернет .....	34
Кунсткамера .....	37, 72, 112

### Вести из лабораторий

Е. ЗУБКОВА — Решётка-невидимка из листа стали (38); Гибридные котятки помогут сохранить исчезающие виды диких кошек (39).	
С. БУРОВА, докт. мед. наук — Среди грибов (беседа ведёт Н. Лескова) .....	41
В. ПУКИШ — Где находилась крепость Темрюка? .....	46
Бюро иностранной научно-технической информации .....	48
Е. МЕЙЛИХОВ, докт. физ.-мат. наук — Авогадро и число его имени .....	52
Р. КРАСНОВ — «1917» — последние медные монеты Российской империи .....	54
О чём пишут научно-популярные журналы мира .....	58
В. УСТИНОВ — Кровавое свершилось злодеянье... ..	62
Хотите стать математиком? .....	74
В. ФИЛАТОВ, докт. геол.-минерал. наук — Алмазоподобный .....	76

### «УМА ПАЛАТА»

Познавательный-развивающий  
раздел для школьников

В. БОЯРКИН, Ю. НАХИМОВА — Разноязычная мухоловка (81). Б. ЕРМОЛАЕВА — Семейка Мяу (85). Н. ГОРЬКАВИЙ — Сказка об электрической лягушке и итальянском физике Алессандро Вольте, основоположнике учения об электричестве (86). Д. МАКСИМОВ — «Кенгуру» для всех-всех-всех (95).	
К. МУХИН, докт. физ.-мат. наук — Экзотическая ядерная физика для любознательных .....	96
В. МАКСИМОВ — Из истории фамилий ...	102
Н. ВЕХОВ, канд. биол. наук — В рукотворном лесу .....	104

В. ТИТОВ — Грибная охота (фантастический рассказ) .....	114
Кроссворд с фрагментами .....	122
В. ЗАКОТИН, канд. с.-х. наук — Как обрезать и формировать плодовые деревья .....	124
В. ХОРТ — Отчаянные головоломки: Джингс-пирамида .....	130
Ответы и решения .....	132
Маленькие хитрости .....	133
С. МОЙНОВ, канд. техн. наук — Альтамира, Ласко, Шове .....	134

### НА ОБЛОЖКЕ:

**1-я стр.** — «ЭкзоМарс-2020» — как это будет 21 марта 2021 года.

15 марта 2017 года, через год после старта миссии «ЭкзоМарс-2016», начался её важнейший этап — перевод аппарата с высокоэллиптической на круговую орбиту высотой 400 км. Протестированные перед этим этапом научные приборы переведены в спящий режим. Тем временем интернациональные команды исследователей и инженеров из научных организаций, в число которых входит и Институт космических исследований Российской академии наук, продолжают работу по подготовке приборов и космического аппарата миссии «ЭкзоМарс-2020», старт которой планируется 25 июля 2020 года.

На рисунке на фоне Марса мы видим спускаемый модуль и доставивший его к планете перелётный аппарат после их разделения перед входом в атмосферу 21 марта 2021 года. Далее через трое суток спускаемый аппарат перейдёт к фазе торможения в атмосфере с последующей мягкой посадкой платформы с марсоходом на поверхность Марса. Перелётный аппарат, выполнив к этому моменту функции по выведению посадочного модуля на траекторию входа, сгорит в атмосфере.

Рисунок: ESA/OHB. (См. статью на стр. 2.)

**Внизу:** Весна! Фото В. Бояркина. (См. статью на стр. 81.)

**4-я стр.** — Юпитер продолжает гулять по созвездию Девы. Одно из воплощений Девы — Персефона. Когда Персефона находится в подземном царстве мужа — Аида, уныние нападает на её мать, богиню плодородия Деметру, и в результате начинается зима. Но зато каждое возвращение Персефоны в мир её дяди Гелиоса пробуждает природу, наливает всё живое новыми соками, приводя с собой весну во всем её блеске и радости. Деметра щедро награждает людей и прежде всего посылает богатый урожай трудолюбивому землепашцу.

В этом номере 144 страницы.



# НАУКА И ЖИЗНЬ®

## № 4

## АПРЕЛЬ

Журнал основан в 1890 году.

Издание возобновлено в октябре 1934 года.

## 2017

## ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ЖУРНАЛ

# «ЭКЗОМАРС»: ОТ МИССИИ-2016 К МИССИИ-2020

Доктор физико-математических наук Натан ЭЙСМОНТ,  
Олег БАТАНОВ, заведующий лабораторией,  
Институт космических исследований РАН.



На рисунке художник изобразил летящий над Землёй космический аппарат «ЭкзоМарс-2016» в момент, когда тот отделился от разгонной ступени «Бриз-М» ракеты-носителя «Протон-М» после вывода на траекторию перелёта к Марсу: его солнечные батареи раскрылись, а параболическая антенна заняла рабочее положение. На обращённой к нам стороне аппарата можно видеть сопло ракетного двигателя, предназначенного для выполнения манёвров на пути к планете и перехода на рабочую орбиту. На противоположной стороне просматривается как часть оранжевого диска спускаемый на поверхность технологический посадочный аппарат «Скиапарелли».

Прогресс, достигнутый в освоении космического пространства за 60 лет, прошедших с начала космической эры, точкой отсчёта которой совершенно справедливо считается дата запуска первого искусственного спутника Земли — 4 октября 1957 года, расширил горизонты познания мира и доказал реальность осуществления проектов, ещё недавно относившихся к области самых смелых мечтаний. Пилотируемая миссия на Марс сейчас воспринимается как вполне реализуемая, пусть и не в ближайшем будущем. А пока что идёт создание международной марсианской лаборатории «ЭкзоМарс». В проекте принимают участие ведущие европейские космические державы — Россия, Франция, Италия, Германия, Нидерланды, а также другие страны, представленные через Европейское космическое агентство (ЕКА). Первый этап — миссия «ЭкзоМарс-2016» — частично реализован: 19 октября 2016 года

на высокоэллиптическую околомарсианскую орбиту доставлен орбитальный космический аппарат TGO (Trace Gas Orbiter), который к марту 2018 года будет переведён на низкую круговую орбиту. Его назначение, помимо научных измерений, — ретрансляция на Землю информации со стационарной посадочной платформы и марсохода, которые достигнут Марса на втором этапе, в 2021 году, и будут функционировать на его поверхности.

Основная задача проекта «ЭкзоМарс» — поиск жизни на Марсе в настоящем или её следов, оставшихся от предшествующих фаз эволюции планеты. Собственно, отсюда и название проекта: слово «экзо» (греч. ἔξω — вне) подразумевает отсылку к экзобиологии, то есть к внеземным формам жизни. Под жизнью понимается та её форма, которую мы наблюдаем на Земле и необходимое условие которой — наличие воды. Результаты исследований, выполненных

*Космический аппарат «ЭкзоМарс-2016», установленный на разгонный блок, перед тем как он будет закрыт обтекателем. На переднем плане — спускаемый аппарат «Скиапарелли», внизу, под орбитальным аппаратом с нераскрытыми солнечными панелями чёрного цвета, видна остронаправленная антенна в транспортном положении, которое она занимает под головным обтекателем на этапе выведения на орбиту и далее до первого сеанса связи во время перелёта к Марсу. На заднем плане, под экранно-вакуумной изоляцией белого цвета, виден разгонный блок «Бриз-М»; его внешняя часть — это сбрасываемые дополнительные топливные баки тороидальной формы.*



Фото: B. Bettle/EESA.



Фото: Роскосмос.

*Старт с космодрома Байконур ракеты-носителя «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М». Видны выглядящие как пунктир сверхзвуковые струи газов со скачками уплотнения, вытекающие из сопел шести двигателей первой ступени. Суммарная тяга этих двигателей превышает 1100 тонн, а скорость истечения струи газов достигает 2900 м/с; это означает, что их мощность равна 16 гигаваттам. Управление положением ракеты осуществляется поворотом сопла каждого из шести двигателей. Вертикальный подъём ракеты длится около 9 секунд. Далее ракета начинает постепенно поворачиваться в положение, близкое к горизонтальному; программа поворота выбирается из условия выведения на начальную круговую орбиту максимальной массы полезной нагрузки.*

приборами космических аппаратов, говорят о том, что вода на Марсе есть, в основном в виде льда, а в прошлом она присутствовала и в жидком состоянии (это среди прочего подтверждают многочисленные русла ныне пересохших рек).

Как признак, но не доказательство жизни на Марсе рассматривают наличие в его атмосфере метана, пусть даже в минимальных концентрациях. Не исключено, что метан продолжает поступать в атмосферу Марса из подповерхностных источников, однако не удерживается в составе атмосферы из-за солнечного ветра. Солнечный ветер, в качестве одной из гипотез, рассматривают и как причину того, что атмосфера Марса разрежена, а жидкой воды на его поверхности нет. Заметим, что результаты исследований Марса важны и для прогноза эволюции Земли.

Проект «ЭкзоМарс» реализуется в два этапа, с двумя запусками. На первом этапе 14 марта 2016 года ракета «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М» вывела на

траекторию перелёта к Марсу космический аппарат, который сейчас находится на орбите Марса. На втором этапе, в 2020 году, будет произведён второй запуск для доставки к поверхности Марса стационарной платформы и марсохода. Схема с двумя запусками позволяет преодолеть ограничения по максимальной массе полезной нагрузки, которую может вывести на нужную траекторию одна ракета-носитель «Протон-М».

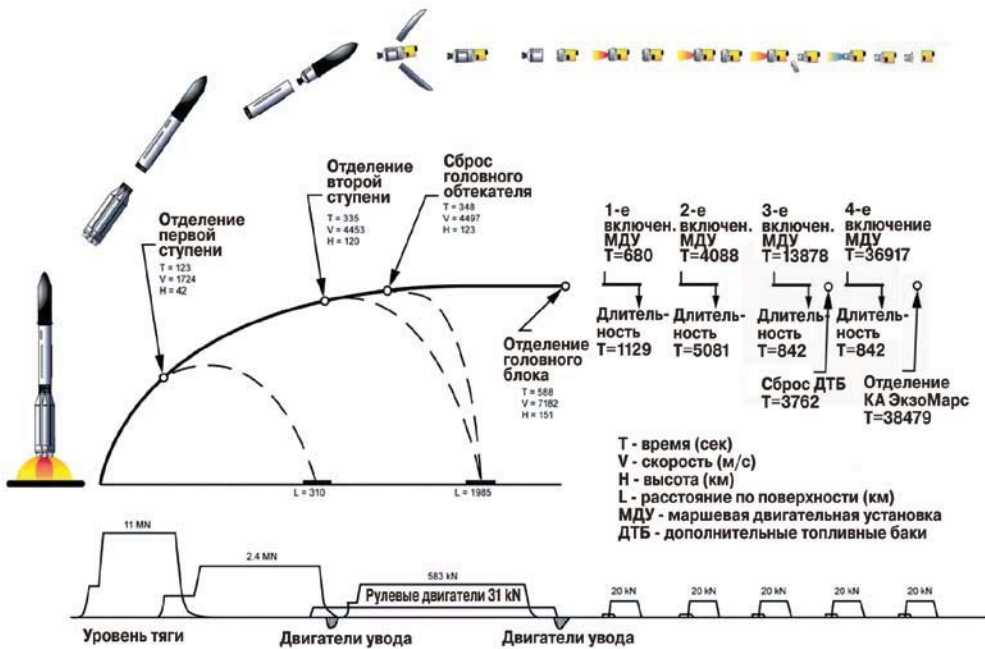
#### **СТАРТ И ВЫХОД НА ТРАЕКТОРИЮ**

Чтобы вывести аппарат на перелётную к Марсу траекторию, используют стандартную последовательность операций, при которой первые три ступени выводят разгонный блок с космическим аппаратом на так называемую суборбитальную орбиту, то есть орбиту с расчётным перигеем под поверхностью Земли. Интервалы работы двигателей первой и второй ступени, а также второй и третьей перекрываются. Иными словами, двигатели последующей ступени запускаются до того,

как отработали двигатели предыдущей. Такой способ разделения ступеней называют горячим. Возникает вопрос: для чего и как это делается? Ответ достаточно прост: для сохранения ненулевого уровня перегрузки, поскольку запустить двигатель в условиях, когда перегрузка равна нулю, можно только при использовании специальных устройств, разделяющих в баках жидкость (топливо) и газ (для вытеснения топлива в двигатель). Без таких устройств жидкость и газ при нулевой перегрузке (это состояние привыкли называть невесомостью, хотя сила веса никуда не исчезает) образуют однородную смесь. Если же подождать с выключением двигателя практически отработавшей ступени, то пере-

грузка сохранит газ над объёмом топлива, сможет вытеснить его и позволит запустить двигатель следующей ступени. Чтобы при этом не прогорели баки отработавшей ступени, их снабжают теплозащитным экраном.

Подъём перигея до высоты промежуточной круговой орбиты (185 км) осуществляется первым из последовательных включений двигателя разгонного блока. Второе включение двигателя происходит на промежуточной круговой орбите, и в результате аппарат переводится на эллиптическую орбиту с высотой апогея 6000 км. Третье включение — в перигее получившейся эллиптической орбиты, оно переводит головной блок на орбиту с высотой апогея 21 000 км. После



Последовательность операций выведения аппарата на перелётную траекторию: первые три ступени ракеты-носителя выводят разгонную ступень с космическим аппаратом (головной блок) на так называемую суборбитальную траекторию, то есть на орбиту с расчётным перигеем под поверхностью Земли. Сброс обтекателя производится на высоте, где плотность атмосферы достаточно мала, чтобы её воздействие не представляло опасности для аппарата и разгонной ступени. В данном случае эта высота составляет 123 км. Отмеченные кружками события на траектории выведения космического аппарата сопровождаются указанием времени с момента старта в секундах, высоты в километрах, величины скорости в метрах в секунду, а также перегрузки в единицах ускорения свободного падения. Под перегрузкой понимается отношение тяги к весу ракеты. Показана не только траектория выведения аппарата, но и траектории падения отработавших ступеней и обтекателя после их отделения, за исключением третьей ступени, которая, как и предыдущие две, падает на поверхность, но не на сушу, а в удалённый от места старта более чем на 10 000 км район океана.

В нижней части рисунка даны графики изменения тяги двигателей (в мега- и килоньютонках) по мере срабатывания ступеней ракеты. Из графиков видно, что интервалы работы двигателей первой и второй ступени, а также второй и третьей перекрываются.

этого внешние баки «Бриз-М» отделяются. Достигнув высоты апогея, головной блок возвращается в перигей. Там производится последнее (четвёртое) включение двигателя, который переводит аппарат на перелётную орбиту, и через 12 минут после выключения двигателя он отделяется от разгонного блока. Весь процесс выведения аппарата «Экзо-Марс-2016» на перелётную траекторию, от момента старта с Земли до отделения от разгонного блока «Бриз-М», занял 10 часов 41 минуту 10 секунд.

Почему так долго? Иначе не удалось бы обеспечить максимум массы выводимого к Марсу космического аппарата при ограничении технических характеристик разгонного блока, в частности максимальной тяги двигателя, равной двум тоннам у «Бриз-М», при начальной массе блока около 22,5 тонны. Дело в том, что сообщаемая двигателем энергия пропорциональна скорости блока, а она максимальна в перигее. Следовательно, с удалением от перигея мы теряем в эффективности. Идеально было бы сообщить необходимое приращение скорости аппарату импульсно, мгновенно, но это не реально, поэтому процедура разгона аппарата до требуемой гиперболической скорости разбивается на три части так, чтобы в ходе каждого из этих трёх манёвров аппарат не успел слишком далеко уйти от перигея.

### ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЕ

Во время перелёта к Марсу научные приборы находятся в режиме ожидания. Главные задачи на этом этапе выполняют служебные системы — устройства, которые обеспечи-

вают энергоснабжение и терморегуляцию, бортовой компьютер, системы навигации, ориентации и управления движением, средства связи.

Космический аппарат получает энергию от солнечных батарей. На удалении от Солнца, равно марсианскому, энергия, получаемая от Солнца на единицу площади, в 2,5 раза меньше, чем на орбите Земли. Поэтому солнечные батареи для «ЭкзоМарса» получились значительных размеров: их площадь 12,8 м<sup>2</sup>, размах 17,5 м. Их электрическая мощность — около 2000 Вт. Панели батарей сделаны поворотными, чтобы следить за направлением на Солнце. Когда аппарат попадает в тень или в случае пиковых нагрузок, энергию дают литий-ионные аккумуляторы с суммарным зарядом 2000 ватт-часов.

Связь с Землёй обеспечивает ортонаправленная параболическая антенна диаметром 2,2 м, работающая в сантиметровом диапазоне радиочастот (X-диапазон), и три слабонаправленные антенны. Скорость обмена информацией с Землёй в X-диапазоне составляет до 2 Мбит в секунду. Информацию принимает европейская часть всемирной сети наземных станций ESTRACK, к которой подключены российские станции дальней космической связи в Медвежьих Озёрах и в Калязине. Для связи орбитального аппарата со спускаемым, а в дальнейшем с посадочной платформой и марсоходом служит радиосистема дециметрового диапазона (UHF).

Во время полёта аппарату приходится менять ориентацию в пространстве, например для того, чтобы навести ось антенны

## ОПЫТ ПРОШЛЫХ МАРСИАНСКИХ МИССИЙ

С 1960 года осуществлено более 40 запусков космических аппаратов к Марсу, включая неудавшиеся. Первый успешный облёт Марса совершил 14—15 июля 1965 года американский космический аппарат «Маринер-4». Минимальная высота облёта составила 9846 км; на Землю отправлен 21 чёрно-белый снимок поверхности планеты. В ноябре того же года советский аппарат «Зонд-2» облетел Марс на высоте 1500 км, однако передать

на Землю телеметрические измерения не удалось. Первыми советскими аппаратами, которые вышли на орбиту спутника Марса, стали запущенные в 1971 году «Марс-2» и «Марс-3» (они передали на Землю 60 снимков поверхности). В задачу этих аппаратов входила и посадка на поверхность. «Марс-3» задачу посадки выполнил, став первым космическим аппаратом, осуществившим посадку на Марс, но, к сожалению, приборы на

поверхности проработали всего 20 секунд. В том же году НАСА вывело на орбиту марсианского спутника «Маринер-9». Миссия оказалась очень успешной: аппарат передал на Землю 7329 снимков; была получена полная карта поверхности Марса; открыто явление длительных пылевых бурь на ней; получены снимки спутников Марса — Фобоса и Деймоса — с очень близкого расстояния. Первым аппаратом, доставившим на поверхность Красной планеты марсоход, стал «Mars Pathfinder» (что можно

на Землю, повернуть солнечные батареи в нужную сторону или совершить манёвр. Система ориентации включает в себя солнечные и звёздные датчики, а также лазерные гироскопы. В память бортового компьютера заложен звёздный каталог, с помощью которого компьютер проводит расчёты и выдаёт команды маховикам и небольшим ракетным двигателям, разворачивающим аппарат в нужное положение.

### НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

Для навигации необходимо знать, где аппарат находится и куда он движется, то есть каковы его координаты и составляющие вектора скорости. Задача решается с помощью средств траекторных измерений, расположенных как на Земле, так и на борту аппарата. Естественно, эти измерения не дают непосредственно ни координат, ни компонентов скорости в требуемой системе отсчёта. Измерения проводят радиотехническими методами, вычисляя дальность и скорость её изменения по смещению фазы и излучённого сигнала, посланного с Земли на аппарат и принятого с аппарата после его переизлучения транспондером.

Точность определения параметров траектории заметно повышается благодаря дополнительным измерениям, когда сигнал, излучаемый передатчиком аппарата, получают несколько наземных станций одновременно с приёмом излучения какого-либо известного квазара, находящегося достаточно близко от направления на космический аппарат. В нашем случае в качестве радиоисточника

выбран квазар P1514-24. В иллюстрирующем эту методику рисунке на с. 8 присутствует неизбежная неточность: квазар, который находится на бесконечно большом расстоянии от Земли и Солнечной системы, на рисунке показан близким, так что его излучение не выглядит параллельным пучком, как это наблюдается в действительности.

Квазарами (от лат. *quas(i)* — наподобие + англ. *(st)ar* — звезда) называют сверхмощные квазизвёздные источники излучения. Они излучают во всех диапазонах волн, включая радиоволны. Мощность этого излучения превышает более чем в тысячу раз мощность излучения всей нашей Галактики. Полагают, что в центре квазаров находятся сверхмассивные чёрные дыры и при падении на них окружающей материи (аккреции) возникает столь мощное излучение. Квазары расположены на рекордно больших расстояниях от нас — дальше 10 миллиардов световых лет, поэтому с Земли они наблюдаются как довольно слабые источники, двадцать второй звёздной величины и более, но для навигации их удалённость имеет преимущество: они практически неподвижны.

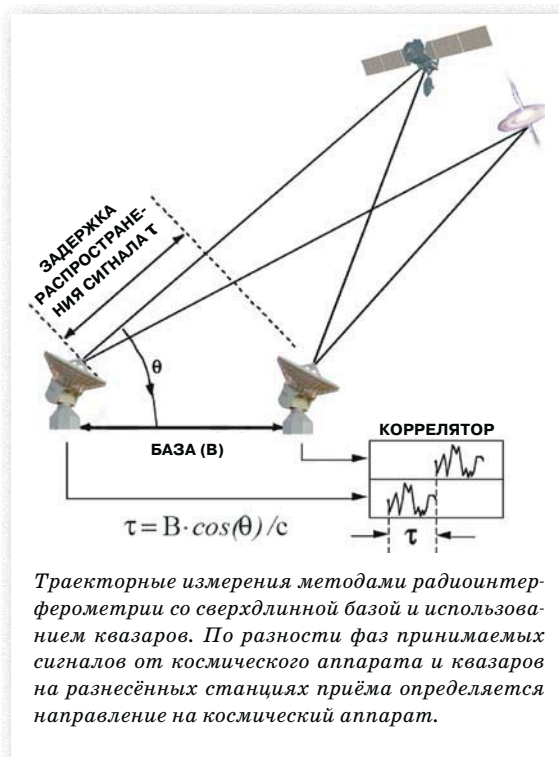
Необходимость с высокой точностью знать параметры траектории вызвана требованием обеспечить попадание спускаемого аппарата в довольно узкий коридор входа в атмосферу. Описанная методика и навигационные средства позволяют решить эту задачу: перед входом в атмосферу координаты аппарата определяются с точностью не ниже 150 м. Напомним, что просто измерениями мы не получаем непосредственно нужные величины, например угол входа спускаемого

перевести как «Марсианский землепроходец») в 1997 году. Аппарат «Mars Climate Orbiter» («Орбитальная климатологическая станция», 1998 год) врезался в планету из-за совершенно невероятной ошибки в расчётах: при определении тормозного импульса для выхода на орбиту спутника Марса вместо ньютонов, оговоренных как единицы измерения силы, были использованы фунты. Рекордсмен по длительности работы — американский аппарат «Марс Одиссей», запущенный в 2001 году

на полярную орбиту для картирования поверхности. Для его перевода на низкую круговую орбиту высотой 400 км использовали аэродинамическое торможение в атмосфере. Станция «Марс Одиссей» функционирует и сегодня, так же как и «Марс Экспресс», запущенный ЕКА в 2003 году. Кроме того, на орбите продолжают работать аппараты «Mars Reconnaissance Orbiter» («Орбитальная разведка Марса»), индийский «Mangalyaan» (в переводе с хинди «Марсианский зонд») и американский MAVEN

(аббревиатура английского названия «исследование эволюции марсианской атмосферы и её изменчивости»). Исследования на поверхности проводят марсоходы «Opportunity» (в переводе с англ. — «Благоприятная возможность») и «Curiosity» («Любопытный»), первый с 2004-го, второй с 2012 года. С запуском космического аппарата миссии «ЭкзоМарс-2016» Россия вернулась на Марс и вновь стала полноправным членом международного сообщества марсианских исследователей.





го аппарата в атмосферу и его координаты. Чтобы вычислить необходимые параметры, результаты измерений подвергают математической обработке и на выходе получают параметры орбиты.

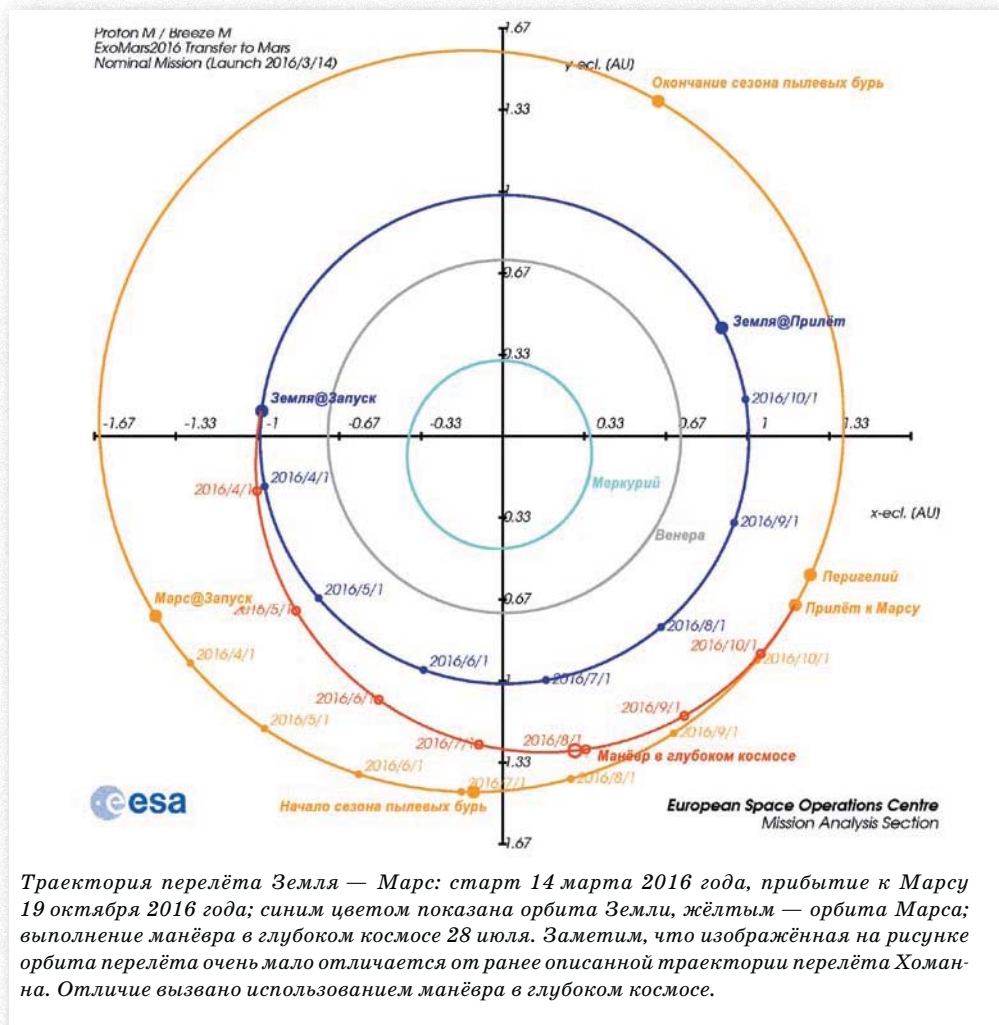
Что это за параметры и сколько их? Возможны различные их наборы, но если речь идёт только о параметрах движения, то минимальное число составляющих для взятого момента времени равно шести. Обычно это три координаты аппарата в экваториальной гелиоцентрической системе и три составляющие скорости в той же системе отсчёта. Для их определения используется максимально полная модель движения аппарата с учётом гравитационного воздействия тел Солнечной системы вплоть до больших астероидов, а также силы давления солнечного света на аппарат. Идея вычислений довольно простая: для момента времени, который обычно совпадает с началом интервала измерений, берут приведённый выше набор траекторных параметров, предполагаемых близкими к истинным, и по этим начальным параметрам для выбранных моментов времени вычисляют разности измеренных величин и их расчётных значений. Далее искомые начальные параметры подбирают таким образом, чтобы расчётные значения изме-

ряемых величин были максимально близки к измеренным. Результат такого подбора принимают за истинный набор параметров орбиты и используют для прогноза траектории на последующие интервалы времени. Точность прогноза в основном определяется точностью траекторных измерений, поскольку применяемые в настоящее время модели движения практически не вносят погрешностей в определение параметров траектории. Правда, для хорошего прогноза на достаточно протяжённый отрезок времени необходимо довольно точно знать давление солнечного света, поэтому его оценки также включаются в число определяемых по измерениям параметров.

Мало знать, где находится аппарат и где он будет находиться в следующий момент, — необходимо привести параметры орбиты к заданным значениям. Для этого в выбранной точке траектории включают ракетный двигатель, чтобы изменить вектор скорости аппарата до значений, обеспечивающих попадание аппарата в определённую точку относительно Марса в заданное время. Для решения этой задачи проводят разворот аппарата так, чтобы направить тягу двигателя вдоль вектора необходимого изменения скорости. Тяга основного двигателя составляет 425 Н; он включается для сообщения аппарату импульсов скорости, превышающих единицы метров в секунду, а для меньших значений изменения скорости используются двигатели с тягой около 10 Н, которые в основном предназначены для управления ориентацией аппарата. Изменение параметров орбитального движения называют орбитальными манёврами. К ним относят номинальные, то есть такие, которые выполняют даже в случае идеального (без ошибок) движения, и корректирующие, которые необходимы для компенсации погрешностей измерений или ошибок при выполнении предыдущих манёвров.

### ВЫБОР ТРАЕКТОРИИ

Проектирование траекторий перелёта от Земли к другим планетам и, в частности, к Марсу состоит в таком выборе параметров, который позволит доставить к цели полезную нагрузку максимальной массы. Полезная нагрузка в данном случае — космический аппарат на целевой орбите или станция на поверхности планеты. Получение необходимой траектории их доставки требует проведения



Траектория перелёта Земля — Марс: старт 14 марта 2016 года, прибытие к Марсу 19 октября 2016 года; синим цветом показана орбита Земли, жёлтым — орбита Марса; выполнение манёвра в глубоком космосе 28 июля. Заметим, что изображённая на рисунке орбита перелёта очень мало отличается от ранее описанной траектории перелёта Хома-на. Отличие вызвано использованием манёвра в глубоком космосе.

орбитальных манёвров. Для оптимального решения задачи необходимо найти способы их выполнения с минимальной затратой топлива. Как правило, это практически совпадает с поиском сценариев и алгоритмов управления движением, требующих минимального суммарного изменения скорости движения аппарата, поскольку, согласно известной формуле Циолковского, требуемое изменение скорости за счёт использования ракетного двигателя пропорционально логарифму отношения начальной и конечной масс носителя или аппарата. Иначе говоря, масса топлива, которое необходимо потратить на разгон космического аппарата, экспоненциально возрастает с приращением скорости.

Заметим, что речь идёт не об экономии топлива как такового (это заблуждение не редкость), а об увеличении массы полезной нагрузки, доставляемой средствами ра-

кетной техники к планете или на заданную орбиту, на величину, равную массе незатраченного топлива.

При выборе орбиты перелёта от Земли к Марсу для миссии «ЭкзоМарс-2016» решались две задачи динамики космического полёта: первая — доставить орбитальный аппарат в окрестность Марса для последующего перехода на высокоэллиптическую орбиту его спутника и вторая — направить спускаемый модуль на траекторию входа в атмосферу планеты для последующей посадки в выбранном районе на её поверхности. Спускаемый аппарат установили на орбитальном, который выполнял все функции управления движением на этапе перелёта к Марсу. За трое суток до операции посадки спускаемый аппарат был направлен в заданную точку входа в атмосферу Марса и отделён от орбитального. Через 12 часов после разделения орбитальный аппарат

импульсом двигателя 10 м/с был переведён на пролётную гиперболическую орбиту с более высоким перицентром, находящимся за пределами опасного воздействия атмосферы. По достижении перицентра двигатель вновь включился на 134 минуты. В результате орбитальный аппарат получил тормозной импульс скорости величиной 1550 м/с и был выведен на близкую к полярной высокоэллиптическую орбиту спутника Марса с периодом обращения четверо марсианских суток (марсианские сутки называются «сол» и длятся 24 часа 39 минут 35 секунд), высотой перицентра 298 км и высотой апоцентра 95 868 км. Слово «импульс» здесь использовано не в буквальном его значении, а как профессиональный термин, означающий изменение скорости объекта под действием реактивной силы без учёта влияния гравитационных сил.

### ОКНА СТАРТА

Как правило, задачу оптимизации траектории перелётов между объектами Солнечной системы решают первоначально в упрощённой постановке, преимущества которой в наглядности и скорости получения решения. Такую задачу поставил и решил немецкий астроном Вальтер Хоманн в 1924 году. В нашем случае в рамках этой постановки следует предположить, что орбиты Земли и Марса круговые, каждая со своим средним радиусом, лежат в одной плоскости, а массы планет равны нулю. Тогда для перехода с орбиты Земли на орбиту Марса минимальный суммарный импульс скорости достигается, если орбита перехода имеет перигелий в точке на орбите Земли, а афелий в точке на орбите Марса. Чтобы попасть на орбиту перехода, аппарату необходимо добавить импульс скорости 2,6 км/с относительно Земли. Далее, чтобы оказаться на орбите Марса, в афелии переходной орбиты необходимо ещё одним манёвром увеличить скорость аппарата на 2,9 км/с. Время полёта по переходной орбите между этими двумя точками составляет 259 суток. Отметим, что описан переход между орбитами, земной и марсианской, нам же необходим перелёт между планетами. Это означает, что момент отлёта от Земли должен быть выбран таким образом, чтобы в момент достижения марсианской орбиты аппарат встретился с Марсом. Тем самым определяется взаимное положение Земли и Марса в момент старта космического аппарата. Простой расчёт,

использующий знание средней скорости поворота направлений от Солнца к Марсу и от Солнца к Земле, позволяет вычислить угол между этими направлениями в момент старта. Этот угол равен примерно  $45^\circ$ . Тем самым определяется дата старта как дата, когда угол между направлениями от Солнца на Землю и на Марс равен указанному. Ответ на вопрос, как часто такая конфигурация повторяется (то есть каков интервал времени между моментами, когда Марс, Земля и Солнце находятся в одинаковом взаимном положении), даёт синодический период орбитального движения Марса относительно Земли, он равен 779,94 суток. С такой периодичностью можно запускать космические аппараты к Марсу. Однако на самом деле, как известно, орбиты Земли и Марса не в точности круговые и не лежат в одной плоскости. Поэтому ни реальные величины импульсов скорости, необходимые для перелёта, ни даты оптимального старта не совпадают с идеальным случаем, хотя и близки к нему. Эти даты группируются в двух областях времени: до идеальной даты и после неё. Как допустимые принимаются интервалы продолжительностью до 20 дней, что соответствует превышению величины требуемого импульса относительно оптимального в несколько десятков метров в секунду. Обычно эти интервалы называют окнами запуска. Для миссии «ЭкзоМарс-2016» первое окно запуска приходилось на январь, а второе — на март 2016 года, начиная с 14 марта. Его длительность была принята равной 13 суткам. В конечном счёте старт состоялся в первый день второго окна, а скорость отлёта от Земли, понимаемая в терминологии, представленной выше, составила 2,727 км/с.

### МАНЁВР В ГЛУБОКОМ КОСМОСЕ

Особенность проекта — жёсткая фиксация даты прилёта, 19 октября. Выполнение дополнительного манёвра в глубоком космосе на пути к Марсу было обусловлено именно этой причиной. Манёвр провели в два этапа, 28 июля и 11 августа. Величина первого импульса, 28 июля, составила 326 м/с. Вторую часть манёвра запланировали и провели как совмещение номинальной составляющей и корректирующей поправки. Она выполнена 11 августа и составила 17,7 м/с. При подготовке миссии также планировали провести первоначальную коррекцию траектории через семь суток после запуска, но работа разгонного блока «Бриз-М» на старте ока-

Суммарная масса выведенной на орбиту перелёта полезной нагрузки (орбитальный аппарат плюс спускаемый модуль «Скиапарелли») составила 4332 кг при массе приборов на орбитальном аппарате 112 кг и массе «Скиапарелли» около 600 кг. В миссии «ЭкзоМарс-2016» модуль «Скиапарелли» пред-

назначался для отработки систем и методов посадки на планету с атмосферой, где необходимое торможение аппарата реализуется за счёт аэродинамического воздействия атмосферы. Наиболее важная конструктивная часть спускаемого аппарата — теплозащитный экран. Он предотвращает

перегрев систем от воздействия теплового потока при аэродинамическом торможении аппарата в атмосфере, когда значительная часть его кинетической энергии переходит в тепловую. В результате максимальная температура на поверхности теплового экрана достигает 1750°C.

залась настолько точна, что коррекция не понадобилась, и её отменили.

Введение манёвра в глубоком космосе в программу полёта вызвано техническими ограничениями тяги двигателя. Она недостаточно велика, чтобы сообщить необходимый импульс торможения в приемлемой близости от перицентра, то есть с допустимыми потерями в полезной нагрузке. Как способ их снизить и был выбран упомянутый манёвр в глубоком космосе. Орбита перелёта в проекции на плоскость эклиптики показана на рисунке на с. 9, где для наглядности приведены также орбиты внутренних планет Солнечной системы: Меркурия, Венеры, Земли и Марса. На орбите Марса отмечены также точки начала и конца сезона пылевых бурь, которые учитывались при планировании миссий.

За 30 дней до максимального сближения с Марсом провели ещё одну коррекцию орбиты и за пять дней — завершающую, которая и обеспечила окончательную точность параметров траектории входа «Скиапарелли» в атмосферу и условия перевода орбитального аппарата на высокоэллиптическую орбиту с параметрами, приведёнными ранее.

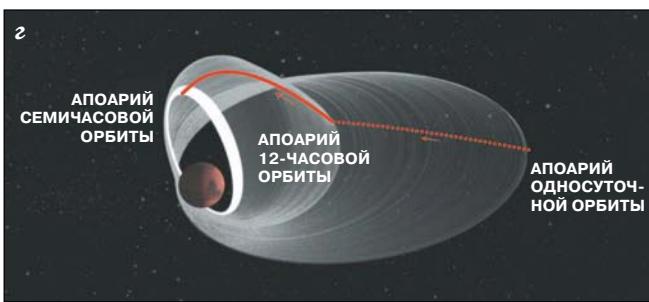
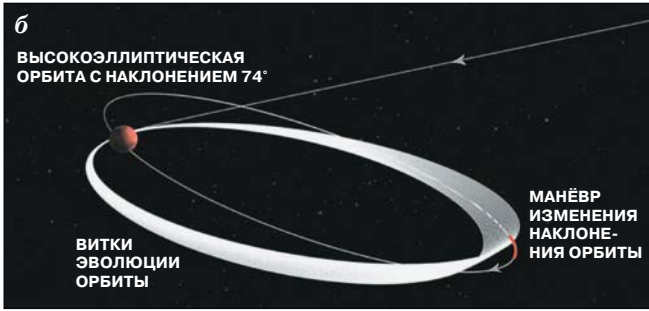
#### **ПЕРЕВОД TGO НА НИЗКУЮ КРУГОВУЮ ОРБИТУ**

Целевая рабочая орбита космического аппарата TGO — круговая с высотой 400 км и наклоном 74 градуса. Возникает вопрос: почему бы сразу не перейти на эту орбиту за счёт работы ракетного двигателя? Ответ дают довольно простые расчёты, показывающие, что такой манёвр требует значительно больших затрат топлива, чем запланированный вариант, предполагающий первоначальный выход на высокоэллиптическую орбиту, с последующим аэродинамическим торможением в районе периария.

Точнее говоря, процедура перевода на низкую круговую орбиту включает в себя дополнительный ракетно-динамический манёвр, выполняемый в районе перицентра, снижающий апоцентр до высоты, соответствующей периоду орбиты в одни марсианские сутки. Манёвры, которые двигатели аппарата TGO выполнили 19, 23 и 27 января 2017 года, изменили наклонение орбиты аппарата с 7 до 74 градусов. В результате плоскость орбиты, изначально почти совпадавшая с экваториальной, наклонилась таким образом, чтобы аппарат проходил над полярными областями. Именно такое наклонение будет у финальной рабочей орбиты с высотой около 400 км над поверхностью.

15 марта 2017 года началось управляемое аэродинамическое торможение («аэробрейкинг»). Его задача — снизить апоарий орбиты до высоты около 400 км последовательными касаниями атмосферы в районе перицентра. Делать это надо очень аккуратно, иначе аппарат может перегреться из-за взаимодействия с атмосферой. Чтобы удерживать требуемую высоту перицентра (около 120—130 км), орбитальному аппарату в районе апоцентра сообщают небольшие импульсы скорости.

Напомним, что технология аэродинамического торможения уже применялась в 2001 году при выводе на околomarсианскую орбиту американского аппарата «Марс Одиссей». Весь процесс азэроторможения орбитального аппарата TGO планируется провести примерно за тринадцать месяцев. Завершится он подъёмом перицентра до 400 км — высоты рабочей круговой орбиты, для чего в апоарии последнего витка орбиты, полученной аэродинамическим торможением, произойдёт включение двигателя. ⇨



Операции аэродинамического торможения с необходимым управлением для поддержания заданных динамических и тепловых ограничений по воздействию набегающего атмосферного потока были смоделированы расчётами. На первом из рисунков (а) отображён переход с подлётной гиперболической орбиты (траектории со скоростью относительно Марса, превышающей вторую космическую) на высокоэллиптическую орбиту спутника Марса. Затем наступает некоторый период ожидания, включающий проверки и настройки систем аппарата, при этом орбита эволюционирует, в основном под влиянием гравитационного поля Солнца. Далее в январе в районе апоария двигатель сообщает аппарату импульс скорости, который изменяет начальное наклонение орбиты до 74 градусов (б). Затем с помощью двигателя в периапии выполняется манёвр по уменьшению высоты апоария до значения, соответствующего суточной околомарсианской орбите (в). Импульсом уменьшения высоты периапия до примерно 120 км аппарат переводят к процессу аэродинамического торможения за счёт последовательных касаний атмосферы на периапийных участках орбиты (г). На этом этапе, наряду с аэродинамическим торможением и влиянием притяжения Солнца, начинает сказываться влияние сплюснутости Марса (и, следовательно, несферичности его поля тяготения). Это приводит к вращению плоскости орбиты аппарата; скорость этого вращения возрастает со снижением высоты апоария. На рис. д показан подъём периапия, завершающий перевод аппарата на рабочую орбиту.

### ПРЕРВАНЫЙ ПОЛЁТ «СКИАПАРЕЛЛИ»

Спускаемый модуль «Скиапарелли», отделённый от орбитального аппарата, начал автономный полёт за трое суток до входа в атмосферу. При отделении для обеспечения пассивной стабилизации он был закручен относительно продольной оси с угловой скоростью в 2,5 оборота в минуту и продолжил движение к Марсу в спящем режиме вплоть до момента активации его систем за 75 минут до входа в атмосферу на высоте 122,5 км со скоростью 21 000 км/ч.

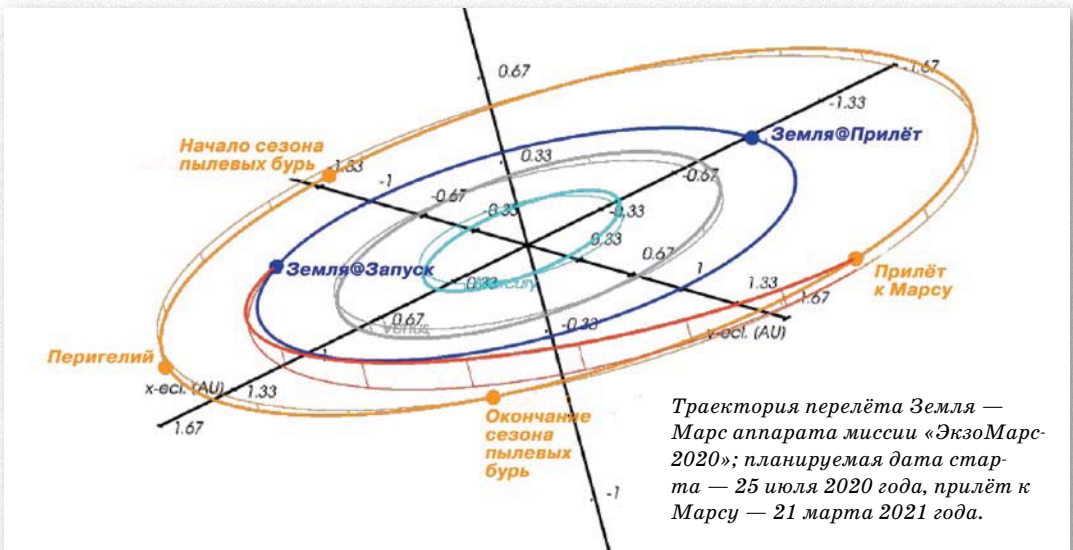
На шестой минуте спуска до высоты 11 км раскрылся парашют диаметром 12 м и скорость снизилась до 1650 км/ч.

Далее на высоте 7 км планировалось сбрасывание теплозащитного экрана и включение доплеровского высотомера для измерения скорости и расстояния до поверхности. Парашют должен был отделиться на высоте 1,3 км с последующим включением тормозных ракетных двигателей, которые предназначались для снижения скорости от 270 км/ч до 7 км/ч. Предполагалось, что свободное падение до встречи с поверхностью начнётся на высоте 2 м. Однако вскоре после раскрытия парашюта произошёл сбой в управлении посадкой, результатом чего стало преждевременное отделение парашюта. Аппарат перешёл в режим свободного падения с высоты 3,7 км и с недопустимо большой скоростью столкнулся с поверхностью Марса. Таким образом, посадка «Скиапарелли» оказалась неудачной,

Периарий и апоарий — соответственно ближайшая к Марсу и наиболее удалённая от него точка орбиты спутника. Вообще, перицентром и апоцентром называют точки орбиты небесного тела, ближайшую и наиболее удалённую от центрального тела, вокруг которого происходит вращение. Вместо частей слов «центр» зачастую употребляют название (обычно греческое) центрального тела. Например, Гея — Земля, Арес — Марс, Гелиос — Солнце. Таким образом образуются перигей, апоарий, перигелий.

но технологически эта часть программы миссии «ЭкзоМарс-2016» дала важные результаты. Во время посадки «Скиапарелли» передавал на орбитальный аппарат данные собственных измерений и параметров работы систем. Эти данные были записаны орбитальным аппаратом и переданы им на Землю после выхода на орбиту спутника Марса. Собранных данных оказалось достаточно для понимания того, что происходило во время посадки и какие коррективы нужно внести в бортовое обеспечение для миссии 2020 года.

Неудачная посадка никак не повлияла на выполнение научной программы миссии. В конце февраля — начале марта проведено тестовое включение научных приборов орбитального аппарата TGO, в том числе спектрометрического комплекса АЦС и нейтронного детектора ФРЕНД, созданных в Институте космических исследований РАН. Во время аэродинамического



*Съезд марсохода с посадочной платформы на поверхность Марса.*



Иллюстрация: ESA.

торможения включения научных приборов не предусмотрено, и полноценные измерения начнутся в следующем году.

#### **«ЭКЗОМАРС-2020» — МИССИЯ С МАРСОХОДОМ**

Вторым запуском примерно через четыре года и четыре месяца после первого (в июле 2020 года) планируется отправить к Марсу полноразмерный посадочный модуль, который должен совершить посадку 21 марта 2021 года. (См. 1-ю стр. обложки.) Дата посадки выбрана неслучайно: она приходится на прогнозируемое окончание сезона пылевых бурь на Марсе. В окрестность планеты, как и в первом, уже реализованном запуске, посадочный модуль доставит перелётный аппарат, важная часть задачи которого — обеспечить требуемую точность начальных параметров движения посадочного модуля (спускаемого аппарата) при входе в атмосферу. Как и со «Скиапарелли», модуль входит в атмосферу с гиперболической скоростью и далее тормозится атмосферой до околозвуковой скорости. После этого открывается парашют, снижающий скорость примерно до 10 м/с. Мягкую посадку обеспечивают тормозные ракетные двигатели. Результатом этих операций станет доставка на поверхность Марса посадочной платформы с марсоходом, который съедет с платформы и приступит к исследованиям поверхности Марса.

К этому моменту орбитальный аппарат TGO уже достигнет своей рабочей орбиты и начнёт, как это планировалось изначально,

обеспечивать связь марсохода и посадочной платформы с наземными станциями. Иными словами, орбитальный аппарат используется для ретрансляции команд с наземных станций на марсоход и платформу и передачи телеметрической информации в противоположном направлении.

Иллюстрации предоставлены авторами статьи.

#### **«Наука и жизнь» об исследованиях Марса:**

- Понятов А. **Что нас ждёт на Марсе?** — 2016, № 4.  
Абаев М. **Солёная правда о марсианской воде.** — 2015, № 11.  
Губарев В. **Академик Лев Зелёный. Дыхание марсианских пустынь.** — 2013, № 10.  
Зимица Т. **Экзомарс расставит точки над «i»?** — 2013, № 8.  
Ильин А. **Луна и Марс как объекты колонизации.** — 2011, № 4.  
Первушин А. **Жизнь в космосе, или Кто полетит на Марс.** — 2010, № 4.  
Ксанфомалити А. **Горные потоки и бассейны на Марсе.** — 2009, № 9.  
Левитан Е. **Есть ли вода на Марсе?** — 2008, № 12.  
Сурдин В. **Нужно ли человеку лететь на Марс?** — 2006, № 4.  
Хазен А. **Ключи к проблеме жизни на Марсе.** — 2004, № 1.  
Остапенко А. **Далёкий Марс близок, как никогда.** — 2003, № 7.  
Фролов Ю. **Прогулки по Марсу.** — 1997, № 9.  
Левитан Е. **Вперёд — на Марс!** — 1994, № 10.  
Нестеренко А. **Полёт на Марс: от фантастических романов — к инженерному проекту.** — 1994, № 6.  
Сагдеев Р. **Стартуем к Марсу.** — 1988, № 5.  
Смирнов И. **Искусственные спутники Марса.** — 1972, № 3.  
Зигель Ф. **Марс: новая встреча и новые проблемы.** — 1971, № 8.  
Зигель Ф. **Каналы Марса.** — 1965, № 4.  
Давыдов В. **Океаны Марса.** — 1963, № 2.  
Цандер Ф. **Вперёд, на Марс!** — 1962, № 10.