

СЕРИЯ КОСМОНАВТИКА АСТРОНОМИЯ 1971

629.78  
С. 467  
Г. А. СТУРИДИН  
УДК

7

изучение  
луны  
и  
планет  
космическими  
аппаратами

Звезд

## **Сумма технологий и космические исследования**

Первые годы космической эры стали грандиозной, по существу, фантастической эпопеей человеческого дерзновения, небывалой по размаху и неповторимой по своим научно-техническим результатам...

Первый искусственный спутник Земли, полет к Луне и передача на Землю фотографий ее невидимой стороны, мягкая посадка на поверхность Луны, спутники Луны, полеты к Марсу и Венере, плавный спуск в атмосфере Венеры автоматических аппаратов и посадка на поверхность планеты, полет человека в космос, выход его в открытое космическое пространство, автоматическая стыковка космических кораблей и их совместный полет вокруг Земли, облет автоматическими аппаратами Луны и их возвращение при входе в атмосферу Земли со второй космической скоростью, создание пилотируемой космической станции, облет Луны человеком, высадка человека Земли на поверхность Луны, доставка лунного грунта с Луны на Землю автоматическими средствами, создание на Луне первого транспортного корабля-лунохода.

Ни одна эпоха не знала такого величественного взлета науки и техники! Можно с уверенностью сказать, что жизнь, возникшая на Земле, неистребимой силой своего развития сделала нашу планету не только колыбелью Разума, но, преодолев земные масштабы, в ближайшие десятилетия распространится на другие планеты и (это не фантастическая мечта) сделает их подлинными континентами человеческой деятельности. Каждый этап развития человечества — это определенная сумма технологий, но в целом — бесконечный ряд развития: от первобытного топора до... преобразования Солнечной системы, открытия новых солнечных систем, управления термоядерной энергией Солнца, создания планетарных континентов.

Когда впервые на земной космодром была доставлена первая космическая ракета, когда был дан ее первый старт, и в космосе появился первый искусственный спутник Земли, — с этого момента люди, создавшие ракету и спутник, уже не принадлежали только Земле — их Разум ворвался в просторы Вселенной, с этого момента началась новая история

Солнечной системы, новый этап ее развития, но уже с участием человека, рожденного на Земле. Во взаимосвязь Земли с остальными телами Солнечной системы, которая управлялась до этого только собственными законами движения, вошел новый могучий фактор — человеческий Разум со всей суммой технологий, накопленной до этого предшествующей историей человеческого развития. С этого момента изменилась масштабность Земли, изменилось взаимоотношение человека и Вселенной. В этом, по существу, — величайшее значение запуска первого искусственного спутника Земли.

Полеты в космос — неистребимая мечта человека. Проходили века мучительных раздумий об окружающем мире и Вселенной. Без телескопов и какой-либо техники, еще не зная законов движения и излучения, только на основе визуальных наблюдений планет и звезд великие пионеры науки о Вселенной закладывали основы материалистического миропонимания. И нередко могучий свет истины вспыхивал вместе со страшными кострами инквизиции, на которых сжигались слеподопыгы человечества. На пути развития науки стояли мрачные силы средневековья, поставившие себе на службу авторитет Птолемея и Аристотеля. И только гений Коперника и Галилея положил начало подлинному изучению космоса.

Исследования движения планет привели сначала к открытию описательных законов Кеплера, а затем к знаменитому закону тяготения Ньютона. В борьбе с природой человек стал находить все новые источники энергии. Мускульная сила уступила место энергии пара, электричества, а в наши дни — гигантской энергии расщепленного атома. Величайшие перспективы открывались перед человечеством. Человек смело шел в неизведанное, открывая на Земле новые материки, моря, океаны, а в небе — новые планеты, созвездия, туманности, проникал все глубже в тайны мироздания. И от наивных мечтаний, окутанных преданиями, человек, вооруженный могучими знаниями законов природы, пришел к осознанию возможности полетов в космос.

Перед учеными и инженерами встала задача изыскания путей осуществления этой дерзновенной мечты человечества. Мы теперь знаем, почему так упорно, несмотря на трудности и даже жертвы, человек стремился к проникновению в космос, поняли какую роль играет изучение космического пространства в развитии науки, какие практические возможности открываются перед человечеством в использовании космоса.

Наши земные представления часто оказываются совершенно недостаточными для правильного понимания окружающего нас мира. В космосе протекают процессы, огромные

по своим масштабам и времени, начиная от термоядерных реакций, создающих энергию звезд, до рождения новых миров. Открытие радиогалактик, квазаров и пульсаров, энергия которых выделяется в виде электромагнитного излучения, потоков релятивистских частиц, магнитных полей большой напряженности — все это говорит о том, что во Вселенной происходят какие-то совершенно новые превращения материи и энергии. Можно с уверенностью сказать, что изучение состояния материи в новых физических условиях, проявляющихся, например, при взрывах сверхновых звезд и других образованиях Вселенной, окажет огромное влияние на развитие науки и техники. В космосе физики находят все новые и новые лаборатории природы, где можно наблюдать процессы, еще не воспроизводимые на Земле. В недрах некоторых звезд вещество имеет плотность в миллион раз большую, чем самое плотное из встречающихся на Земле, а в межпланетном пространстве плотность газа в миллиард раз меньше, чем в условиях самого лучшего лабораторного вакуума. Только в глубинах космоса способны рождаться частицы, обладающие энергией, в сотни миллионов раз превышающей ту, которую можно получить на современном ускорителе.

В космосе с особой силой проявляются сложные взаимодействия частиц материи с магнитными полями, что послужило основанием для развития новой области физики — космической магнитогидродинамики. Совместные движения материи и магнитного поля, движение в пространстве сгустков заряженных частиц, неразрывно связанных с магнитными полями, как бы «вмороженных» в сгусток, особые магнито-гидродинамические волны — все эти явления дают богатый материал для понимания физики космоса и открывают широкие перспективы использования их при создании новых источников энергии — плазменных двигателей, с помощью которых возможно дальнейшее проникновение в глубины Вселенной.

Более полувека физики изучают космические лучи, представляющие собой поток различных частиц высоких и сверх-высоких энергий. Они несут огромную информацию о микромире и макромире. Действительно, давление и плотность энергии космических лучей (их энергия в единице объема) в нашей звездной системе сравнимы с давлением и плотностью энергии магнитных полей и с плотностью кинетической энергии движущегося межзвездного газа. Поэтому космические лучи играют важную роль в изучении эволюции нашей Галактики. В радиогалактиках давление космических лучей больше давления и плотности энергии магнитного поля, вследствие чего на определенном этапе происходят как бы взрывы в радиогалактиках с огромным выбросом газа

в космических лучей. Все это явления огромных масштабов и колоссальной энергии. Вместе с тем космические лучи — типичный объект микромира, так как они состоят из элементарных частиц (протонов, электронов,  $\gamma$ -квантов), из ядер различных химических элементов, ускоренных до очень больших энергий. Физика высоких энергий, или, как ее называют, физика элементарных частиц, обязана своим рождением именно космическим лучам.

Характер взаимодействия частиц при сверхвысоких энергиях имеет фундаментальное значение в проблеме изучения истории Вселенной в связи с открытием в центрах галактик материи, концентрирующей в себе огромный запас энергии. Наличие двух аспектов в проблеме космических лучей привело к появлению двух направлений в физике космических лучей — ядернофизического и космофизического. Однако несмотря на то, что ученым уже сравнительно давно стала ясна роль космических лучей в изучении глубинных явлений природы, до самого последнего времени не удавалось полностью использовать всю потенциальную мощь этого средства исследований в различных областях науки. Дело в том, что проведение соответствующих экспериментов в наземных условиях требует очень длительных отрезков времени, исчисляемых иногда годами. Это время значительно сокращается, если эксперименты проводить либо на больших высотах в атмосфере Земли, либо за ее пределами с применением тяжелой научной аппаратуры.

Одна из важнейших проблем изучения космоса — энергетика космических процессов. Следует подчеркнуть, что эта проблема, помимо своего фундаментального научного значения, имеет огромное практическое значение. Как пишет академик А. Б. Северный, «...современная космическая физика ставит задачу раскрыть сущность процессов, которые приводят к сверхмощному выделению энергии в космических объектах, таких, как Солнце, звезды, ядра гигантских звездных систем — галактик...

Долгое время загадки энергетики космоса не удавалось решить, пока не было выдвинуто предположение, что в основе энерговыделения звезд лежат термоядерные реакции, которые неизбежно должны возникнуть в раскаленной, в основном водородной, массе звезды и поддерживать ее нагрев на постоянном уровне. Так почти четверть века назад развилось представление о звездах как о гигантских самоподдерживающихся термоядерных реакторах. Раскрытие одной из тайн космоса положило основу для современных работ физиков над управляемыми термоядерными реакциями...»

Недавно астрономы открыли в отдаленных районах Вселенной ряд одиночных, но светящихся с фантастической яр-

костью «маяков». Она назвали эти образования квазизвездами, или квазарами. Квазары свидетельствуют о возможном наличии в мире новой силы, настолько огромной, что ее трудно представить. О природе квазаров высказываются различные точки зрения. Несомненно одно, что это чудо космоса («ужасный икс» — как говорят о нем физики и астрономы) сыграет революционную роль в понимании многих процессов, происходящих во Вселенной, и подобно открытию термоядерных реакций, окажет существенное влияние на развитие современной физики и технический прогресс человеческого общества.

Огромное научное и практическое значение имеет изучение планет и ближайшего к нам небесного тела — Луны. Раскрытие общих закономерностей в эволюции планет Солнечной системы, их образовании, изучение поверхности и атмосфер планет позволит глубже понять природу Земли с целью улучшения жизни людей.

В вопросе о происхождении планет существует много неясных вопросов. Вместе с тем только развитие космической техники позволит накопить необходимый экспериментальный материал для создания правильной количественной теории образования Солнечной системы.

Проблему исследования Луны можно разбить в основном на три категории:

- а) структура лунных недр и процессы, протекающие в лунных недрах;
- б) строение, состав поверхности Луны и их преобразование;
- в) история и эволюция, в результате которых формировалась современная поверхность Луны.

Перечисленные категории относятся ко всем объектам Солнечной системы планетных и субпланетных размеров. Что касается Луны, особый интерес представляют процессы, относящиеся не только к ее поверхности, но являющиеся общими для Солнечной системы. В первую очередь это относится к проблеме взаимодействия солнечного ветра с планетами и телами Солнечной системы.

В этой связи чрезвычайно важно выделить четыре основные проблемы:

- а) взаимодействие солнечной плазмы с планетами, имеющими магнитное поле и атмосферу (Земля, Юпитер);
- б) взаимодействие солнечной плазмы с планетами, имеющими атмосферу, но при отсутствии магнитного поля (Венера, Марс);
- в) взаимодействие солнечной плазмы с небесными телами, не имеющими ни атмосферы, ни магнитного поля (Луна и другие спутники планет);

2) взаимодействие солнечной плазмы с хвостами комет.

Исследование этих эффектов важно для изучения как самих небесных тел, так и их ближайших окрестностей.

Изучение Луны имеет особое значение еще и потому, что древние горные породы и отложения на ее поверхности могут служить основой для хронологии событий, относящихся к образованию или аккреции планет Земной группы (Земля, Марс, Венера).

Основной целью исследования Луны является изучение прошлого нашей планеты и Солнечной системы. Главным моментом во временной перспективе является обнаружение стратиграфической последовательности, порядка, в котором накладывались отложения прошлого. Трудность наземной регистрации обусловлена тем, что в результате активного горообразования, эрозии и воздействия осадочных пород какие-либо остатки раннего периода образования Земли оказались разрушенными. В настоящее время нам не известно почти ничего конкретного о первом миллиарде лет истории Земли.

Луна представляет собой интерес для исследования истории Солнечной системы по двум причинам. Во-первых, поверхность Луны может быть одним из нескольких мест, где сохранились и поддаются расшифровке наиболее ранние стратиграфические свидетельства. Во-вторых, вследствие близости Луны к Земле возможно гораздо более детальное изучение геологии Луны при затрате одинаковых усилий, чем изучение геологии другой ближайшей планеты земной группы. События, зарегистрированные на Луне, видимо, имеют большую степень корреляции с земными, чем события истории на других планетах. С этой точки зрения история Луны, по-видимому, должна напоминать историю Земли. Изучение происхождения Луны позволит выяснить окончательно вопрос об общности эволюционной истории Земли и Луны. Поскольку геологические процессы, изменяющие поверхность Луны, действуют, вероятно, гораздо медленнее, чем геологические процессы на Земле, часть лунной стратиграфической эволюции отражает раннюю историю Солнечной системы, которая никогда не может быть обнаружена на Земле. Временные изменения, сохраненные в лунных слоях, относятся к ряду процессов Солнечной системы.

Решение проблемы происхождения планетных тел будет значительно облегчено изучением изначальной или очень древней поверхности одного из тел Солнечной системы, химического и изотопного состава или даже интенсивности старых магнитных полей в Солнечной системе посредством палеомагнитных измерений на древних магматических породах. Многие основные проблемы Земли могут быть решены

сравнением Земли с Луной. До настоящего времени нет полной ясности в химической эволюции коры Земли, усложненной в результате преобразования поверхностными водами. Луна может служить в этом отношении примером незавершенной эволюции. Возможно Луна представляет наилучшее место для того, чтобы посмотреть, как выглядит ранняя кора. Процессы горообразования на Земле поняты лишь частично, поскольку тектонически активные области покрыты океанами или толстыми осадочными породами.

Применительно к Луне тектоническая деформация поверхности может быть изучена без маскировочного эффекта, эрозии, образования осадочных пород или океанов. Аналогичным образом вулканические продукты, загрязняющие на Земле прохождение через химически преобразованные поверхностные отложения, на Луне должны быть свободными от таких эффектов. Луна является вторым после Земли относительно крупным телом Солнечной системы, которое может быть изучено непосредственно человеком. Кроме удовлетворения естественного интереса к составу и истории Луны, ее изучение дает возможность понять основные проблемы морфологии Земли и планет Солнечной системы. Изучение фигуры Луны, распределения вещества внутри нее, теплового потока из недр Луны и магнитного поля расширит наши знания о составе и истории системы Земля—Луна.

Если Луна, как ближайшее к Земле небесное тело, представляет исключительный интерес с точки зрения истории и эволюции Солнечной системы, изучения ранней стадии ее формирования, состава и геологического строения, то планеты Солнечной системы наряду с уже рассмотренными вопросами имеют важнейшее значение с точки зрения изучения формирования гидросферы и атмосферы, условия возникновения мощнейшего геологического фактора — жизненных процессов.

В этом отношении Марс является наиболее удивительной планетой, давно волнующей человеческое воображение возможностью существования там жизни, может быть в самом неожиданном виде. И если действительно там будут открыты живые организмы, то без преувеличения можно сказать, что их изучение станет проблемой века! Открытие новой точки жизни послужит первой биологической связью Земли с другими планетами, человек Земли сможет оказать существенное влияние на дальнейшее развитие внеземной жизни и на формы ее существования. Однако научная сложность решения этой проблемы заключается не столько в посылке космического аппарата и доставке приборов на поверхность Марса, сколько в том — по каким признакам мы должны судить о наличии или отсутствии жизни на планете. В настоящее время мы еще не имеем достаточно надежного метода,



способного отделить формы «на грани жизни» от отсутствия каких-либо признаков жизни. Как правильно указывает Уильям Корлисс, рассмотревший эту проблему, «...каковы вопросы, которые следует ставить при обнаружении жизни? Разумеется, никто не может дать стопроцентного ответа, но можно различить три большие группы вопросов:

а) вопросы, связанные с тем, имеют ли исследуемые планеты химические соединения подобные аминокислотам и белкам;

б) вопросы, связанные с тем, имеет ли место обмен веществ — поглощаются ли питательные вещества земного типа внеземными образцами в химических реакциях, которые характерны для земной жизни;

в) вопросы, связанные с тем, могут ли быть обнаружены формы жизни (животные), остатки жизненных форм (ископаемые) или искусственные сооружения («каналы»)»<sup>1</sup>.

Ни один из этих вопросов не является окончательным, так как все они основываются на допущении, что жизнь на другой планете подобна земной. Тем не менее мы вынуждены пока исходить именно из этого предположения, беря за основу три отличительных признака жизни: обмен веществ, размножение и эволюция. Эти признаки универсальны для всех живых организмов на Земле. С этой точки зрения чрезвычайно важной проблемой является изучение физических условий на планетах, насколько эти условия благоприятны для протекания биологических процессов. Марс, по-видимому, является единственной возможностью обнаружить внеземную жизнь в пределах Солнечной системы.

Что касается проблемы поиска внеземных цивилизаций, то мы можем повторить слова греческого философа Метродора (IV в. до н. э.): «...кажется нелепым, что на большом поле растет лишь один стебель, а в бесконечном пространстве существует лишь один мир».

Мы переживаем сейчас эпоху «великих географических открытий» в космосе. «...Вначале были пряности!» — восклицал С. Цвейг в повествовании о великом путешествии Магеллана. Какие же «пряности» ожидают нас при исследовании космоса, какую практическую пользу извлекает человечество, создавая уникальные космические аппараты и космические корабли и отправляясь на них в путешествия «в погоне за светом и пространством».

Многие процессы на Земле требуют глобального охвата, и их изучение возможно только с помощью средств, пользуясь которыми, можно будет проводить исследования по всему земному шару одновременно. Такие исследования важ-

<sup>1</sup> «International sciences and technology», 1965, № 37.

ны не только для изучения верхних слоев атмосферы, но и при изучении глобальных процессов, протекающих в ее нижних слоях и ответственных за изменения погоды. Использование спутников открывает огромные возможности в исследовании энергетики Земли как планеты, теплового режима земной поверхности, атмосферы и ряда других проблем.

Системы метеорологических спутников — одно из важнейших направлений использования ракетно-космической техники в практических целях. В Советском Союзе уже создана и успешно действует метеорологическая система «Метеор». Поступающая метеорологическая информация непосредственно используется в прогностических целях.

Другим важнейшим направлением является использование спутников для дальней космической связи. Известно, что особенности распространения радиоволн не позволяют установить прямую радиосвязь со всеми точками земного шара, а тем более прямые телевизионные передачи.

Наиболее выгодны связанные спутники с высокоапогейными орбитами. Это позволяет не только увеличить время связи, но и обеспечить непрерывную связь с двумя пунктами, удаленными друг от друга на значительном расстоянии. Важно отметить, что подобную связь можно осуществить с помощью одного спутника. Для этого необходимо правильно выбрать высоту круговой орбиты спутника, а также осуществить запуск спутника таким образом, чтобы плоскость орбиты спутника совпала с плоскостью экватора Земли (экваториальная орбита). Если далее потребовать, чтобы период обращения спутника равнялся периоду обращения Земли  $T=24$  ч, то как показывают расчеты, высота его орбиты должна равняться  $h=36\,454$  км. Такой спутник будет неподвижно «висеть» над определенной точкой земной поверхности. Спутники подобного типа называются синхронными, а их орбиты — стационарными. В этом случае максимальная дальность непрерывной радиосвязи достигает  $\sim 18$  тыс. км.

Если создать систему из трех синхронных спутников, расположенных на орбите в определенном порядке, то можно осуществить непрерывную связь по всему земному шару.

В Советском Союзе создана и успешно действует система спутников «Молния» вместе с системой наземных станций «Орбита».

Применение спутников в народнохозяйственных целях является одной из важнейших задач современной космической техники. Эта задача включает в себя комплекс экономических, социальных и международных проблем. По существу, проблема рационального использования природных ресурсов затрагивает основы жизни на Земле и включает в себя:

- 1) производство продуктов питания, добываемых как на

суше, так и в океане — с точки зрения национального и всемирного пищевого бюджета;

2) управление лесным хозяйством;

3) использование водных ресурсов, включая бассейны рек, воды континентов и прибрежных областей океанов;

4) состояние природы — проблемы загрязнения воды и воздуха, шума и сохранение естественных природных богатств;

5) взаимодействие человека и природы — урбанизация, создание новых городов и воспроизводство природных ресурсов;

6) транспорт, в частности, судоходство в океанах

Пока в этом смысле можно говорить о различных заманчивых перспективах. Прежде всего, весьма интересны телевизионные и инфракрасные изображения Земли. Особенно большой интерес представляет фотографирование природных образований с космических кораблей. Для использования подобных фотографий в интересах обширной группы наук о Земле, а также геоботанических, агробиологических и других исследований исключительно важное значение приобретает высокая пространственная разрешающая способность изображений (имеются в виду не только цветные фотографии, но снимки в разных участках спектра). Этим требованиям как раз лучше всего удовлетворяют фотографии, сделанные из космоса.

При всех достижениях современной автоматики и телемеханики мозг человека остается самым надежным программирующим устройством с точки зрения быстрого логического анализа обстановки и принятия решения о ходе эксперимента. Поэтому участие человека в осуществлении научных программ на борту спутника дает столь важное преимущество, как сознательный выбор объектов исследования. Поскольку для изучения природных ресурсов Земли основным материалом служит прежде всего изображение земной поверхности, то большую роль играют визуальные наблюдения космонавта. Правда, человек способен воспринимать окружающий мир при помощи аппарата зрения только в очень узком спектральном участке, который называется видимой областью спектра. Как правило, к этой области спектра относятся и обычные фотографии. Однако в необходимых случаях фотопленка может значительно расширить диапазон спектральной чувствительности, в том числе в направлении инфракрасной области спектра, т. е. более длинных волн.

В Советском Союзе некоторые из этих задач решаются при полетах искусственных спутников серии «Космос» и пилотируемых кораблей «Союз».

От познания глубочайших свойств Вселенной к практическому использованию изученных закономерностей для нужд

человечества — таков стремительный путь применения ракетно-космической техники. Мы приближаемся к новой кульминации нашего века, когда технические возможности современности сольются воедино с величайшими открытиями науки о Вселенной. Об этом удивительном единстве науки и техники писал известный американский физик В. Вайскопф: «...Большой поддержкой пользуется сейчас космическая техника, которая может позволить нам исследовать неизведанные уголки Солнечной системы. Исследование неизвестного всегда было существенной компонентой человеческих стремлений в нашей современной цивилизации. Но оно должно идти в ногу, как это всегда и было, с другой столь же существенной компонентой — объяснением неизвестного, в какой бы форме мы его ни встретили. В начале XVI в., когда началась эра науки, Магеллан совершил первое кругосветное путешествие. Но в тот же самый период Коперник опубликовал свою работу о движении планет»<sup>1</sup>.

Шестидесятые годы нашего века, вместе с крупнейшими достижениями космической техники, принесли фундаментальные научные открытия в изучении Луны и планет Солнечной системы.

## Магнитные поля Луны, Венеры и Марса

Вопрос о том, обладают ли другие небесные тела Солнечной системы собственными магнитными полями, имеет огромное значение для изучения внутреннего строения планет и их космогонической истории. С этой точки зрения первостепенное значение имели непосредственные измерения магнитных полей Луны, Венеры и Марса с помощью космических аппаратов. В течение 1959—1970 гг. были осуществлены полеты советских и американских космических аппаратов в сторону Луны, Марса и Венеры.

12 сентября 1959 г. стартовала вторая космическая ракета со станцией «Луна-2», которая впервые в мире 14 сентября 1959 г. достигла поверхности Луны. На борту станции был установлен трехкомпонентный магнитометр с диапазоном измерения 700 гамм ( $\gamma$ ) ( $1 \gamma = 10^{-5}$  эрстед), разрешающая способность которого по каждому каналу составляла во время полета  $\sim 30 \gamma$ .

Первый и основной вывод, который удалось сделать при анализе показаний магнитометра во время его работы на участке полета, составляющих несколько долей лунного радиу-

<sup>1</sup> «Успехи физических наук», т. 86, вып. 4, 1965, стр. 603.

са, состоял в доказательстве того факта, что если Луна и может обладать магнитным полем, то эффективный магнитный момент Луны может быть только меньше  $10^{-4}$  магнитного момента Земли. В то же время можно было предполагать о наличии у Луны слабого магнитного поля, возникающего за счет взаимодействия лунной поверхности и солнечной плазмы с замороженным магнитным полем, а также за счет остаточного намагничивания. Солнечный ветер способен существенно исказить магнитное поле Луны, «углубить» его под поверхность Луны. Кроме того, не исключалась возможность, что магнитный «шлейф» Земли, достигая с ночной стороны лунной поверхности, также оказывает воздействие на магнитное поле Луны. Измерения, проведенные на американском спутнике «Эксплорер-18», показали некоторое увеличение магнитного поля, когда спутник находился на расстоянии 150 лунных радиусов от поверхности Луны.

Было высказано предположение (Несс и другие), что в это время спутник «Эксплорер-18» находился внутри области ударной волны, образуемой при взаимодействии солнечного ветра с поверхностью Луны, чем и вызвано незначительное увеличение магнитного поля в окрестности Луны. Вопросы об образовании ударной волны около Луны были подробно рассмотрены Мишелем, Голдом и Тозером (США).

Возможный механизм образования ударной волны связан со сгущением силовых линий магнитного поля, замороженного в плазму, при обтекании небесного тела, имеющего высокую электропроводность. В этом случае реализуются две возможности: 1) средняя проводимость небесного тела высока, а толщина скин-слоя  $\delta$  мала по сравнению с радиусом тела, т. е.  $\delta \ll R$ ; 2) в центре небесного тела находится сильно проводящее ядро. В первом случае условием образования ударной волны является:  $\frac{8\pi\sigma_A R \cdot v}{c^2} \gg 1$ , где  $\sigma_A$  — проводимость Луны.

Механизм образования ударной волны связан с тем, что силовые линии не могут проникнуть внутрь небесного тела и у поверхности образуется наведенное магнитное поле, которое не позволяет рекомбинироваться частицам солнечного ветра на лунной поверхности. Если подставить необходимые числовые значения, мы получим для  $\sigma_A$  значение, при котором возможно образование ударной волны:  $\sigma_A \gg 10^{-8} \text{ (ом} \cdot \text{см)}^{-1}$ .

Во втором случае плазма солнечного ветра поглощается поверхностью тела, а силовые линии магнитного поля плазмы проходят в глубь тела, задерживаясь на проводящем ядре и образуя наведенную магнитосферу внутри слоя со слабой проводимостью. В связи с этим необходимо было решить вопрос о реальном существовании ударной волны у Луны.

В конце марта 1966 г. был запущен первый искусственный спутник Луны — космическая станция «Луна-10». Разрешающая способность трехкомпонентного магнитометра, установленного на станции, составляла  $\sim 1$   $\gamma$  по каждой компоненте. Результаты измерений показали (как в случае, когда Луна находилась внутри магнитного шлейфа Земли, так и вне его), что Луна не имеет собственного поля дипольной природы, а также, что измеренное поле имеет регулярный характер. Величина поля  $\sim 10\text{--}15$   $\gamma$  достигалась только для поперечной составляющей магнитного поля —  $B_1$  (Долгинов и др.).

В 1967 г. на орбиту вокруг Луны был выведен американский спутник «Эксплорер-35». В это же время в межпланетном пространстве работали ранее запущенные американские космические аппараты — «Эксплорер-33» и «Эксплорер-34». Одновременные измерения на трех космических аппаратах подтвердили результат «Луны-2» и «Луны-10», что ударная волна у Луны не образуется, плазма солнечного ветра поглощается поверхностью Луны, а магнитные силовые линии свободно проходят через тело Луны. При этом было показано, что фронты флуктуаций магнитного поля при прохождении существенно не искажаются. При этих условиях удалось показать, что средняя проводимость Луны  $\sigma_{\text{ср}} \sim 10^{-8} \div 10^{-7}$  (ом·см) $^{-1}$ .

Экспериментальное исследование магнетизма планеты Венеры началось в декабре 1962 г., когда космический аппарат «Маринер-2» прошел на расстоянии 41 000 км от центра Венеры. Измерения на «Маринер-2» не обнаружили существенных изменений магнитного поля, которые можно было бы связать с присутствием планеты.

В июне—октябре 1967 г. был осуществлен выдающийся полет к планете Венера космической станции «Венера-4». Магнитные измерения на станции «Венера-4» проводились вплоть до расстояний 200 км от поверхности планеты. Диапазон измерений поля магнитометра составлял  $\pm 50$   $\gamma$  по трем компонентам и чувствительностью  $\sim 1,6$   $\gamma$ . Станция «Венера-4» приблизилась к планете с ночной стороны, близко от линии терминатора (граница день—ночь) и экватора. С расстояний  $\sim 38\,000$  до 6300 км до центра Венеры данные об измерении магнитного поля поступали каждые 7 сек.

Характер изменения магнитного поля на припланетном участке можно представить следующим образом: на расстоянии  $\sim 38\,000$  км (момент начала измерения) поле составляет  $\sim 18$   $\gamma$ , что существенно превышает значение межпланетного поля в магнитоспокойные дни. На расстоянии 28 000 км от центра Венеры напряженность магнитного поля упала до  $\sim 14$   $\gamma$ . Характер поля на припланетном участке 38 000—28 000 км был регулярным, само поле мало менялось

по направлению. На участке полета между 28 000 и 6300 км характер поля резко изменился: было отмечено два максимума в напряженности поля — 32 γ на расстоянии 23 000 км и ~ 30 γ на расстоянии ~ 15 000 км, поле сильно турбулизировано. На конечном участке измерения, т. е. на расстоянии 6300 км, значение поля оказалось равным ~ 18 γ — таким же, как и на расстоянии 38 000 км.

Существенной особенностью появления максимумов напряженности магнитного поля является то, что они совпали с резким увеличением концентрации плазмы. Анализ магнитных измерений на припланетном участке полета космической станции «Венера-4» позволил установить:

1. Планета Венера не обладает собственным дипольным магнитным полем. Отношение дипольного момента Земли к дипольному моменту Венеры равно  $M_z \sim 10^4 M_v$ .

2. При взаимодействии солнечной плазмы с планетой Венера возникает «ударная» волна, т. е. планета оказывает возмущающее действие в межпланетной среде.

Механизм образования ударной волны у планеты Венера при обтекании тела планеты плазмой солнечного ветра может быть связан с двумя физическими особенностями (при отсутствии у планеты собственного магнитного поля):

внутри Венеры имеется ядро с высокой проводимостью. В этом случае, как показали приближенные расчеты (К. И. Грингауз и др.), для образования ударной волны вблизи лобовой точки достаточно, чтобы толщина проводящей оболочки была бы в 10 раз меньше проводящей оболочки Земли;

Венера обладает ионосферой с высокой проводимостью. Как показали американские измерения на дневной стороне Венеры на высоте ~ 140 км обнаружен главный максимум электронной концентрации с  $N_e \sim (5 \div 6) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Поэтому второе предположение является вполне достаточным для образования ударной волны.

Расчеты положения фронта ударной волны в газодинамическом приближении после полетов космических станций «Венера-6» и «Маринер-5» проводились для различных чисел Маха ( $M=2 \div 10$ ) (Грингауз и др.). Однако здесь обнаружилось некоторые расхождения с моментами начала регистрации плазменных возмущений и расчетного пересечения станциями «Венера-4», «Венера-6» и «Маринер-5» фронта ударной волны. По-видимому, это говорит о том, что соотношения газовой динамики, на основе которых проводились расчеты, не очень хорошо удовлетворяют данным магнитных и плазменных измерений около Венеры, и не позволяют окончательно решить вопрос о том, являются ли отмеченные возмущения действительно ударной волной. Строгой кинетической или магнитогидродинамической теории о взаимодействии плазмы солнечного ветра с небесным телом, не облада-

ющим собственным магнитным полем, но имеющим проводящую газовую оболочку, пока нет, что существенно затрудняет правильную интерпретацию результатов измерений. В связи с этим приобретают особое значение модельные эксперименты в лабораторных условиях (И. М. Подгорный и др.).

В июле 1965 г. космический аппарат «Маринер-4» прошел на расстоянии 13 200 км (3,9 радиуса Марса) от центра Марса. Магнитные измерения проводились с помощью двух магнитометров: феррозондовым с разрешающей способностью 0,35 γ по каждой из трех компонент и гелиевым для измерения скалярной величины поля с погрешностью ~ 0,1 γ.

14 июля 1965 г. в 01.23 мирового времени измеряемые значения поля резко изменились на 5 γ и флуктуации усилились. Возмущения магнитного поля продолжались около 3 ч, после чего значение поля приблизилось к межпланетному. По-видимому, в этом случае космический аппарат пересек границу фронта ударной волны. Если исходить из предположения, что положение фронта ударной волны модельно повторяет положение фронта ударной волны у Земли, то можно оценить магнитный момент Марса из соотношения

$$M_{\text{ж}} = M_{\text{з}} \left( \frac{R_{\text{ж}}}{R_{\text{з}}} \right)^3 \cdot \left( \frac{P_{\text{ж}}}{P_{\text{з}}} \right)^{1,2},$$

где  $M_{\text{ж}}$  и  $M_{\text{з}}$  — магнитные моменты Марса и Земли,  $P_{\text{ж}}$  и  $P_{\text{з}}$  — давления солнечного ветра у границы ударного фронта Марса и Земли. Учитывая измеренные значения  $P_{\text{ж}} = 2 \cdot 10^{-8}$  дин/см<sup>2</sup>;  $P_{\text{з}} = 0,5 \cdot 10^{-8}$  дин/см<sup>2</sup>, получим для оценки магнитного момента Марса  $M_{\text{ж}} \leq 10^{-4} \cdot M_{\text{з}}$  (Смит, Девис).

## Атмосфера Венеры и Марса

Исследование атмосферы Венеры космическими аппаратами началось в 1962 г., когда впервые 14 декабря космический аппарат «Маринер-2», пролетая мимо планеты, произвел измерения температуры облачного покрова и поверхности Венеры. Однако эти данные не могли дать каких-либо оснований для построения количественной модели атмосферы Венеры из-за отсутствия сведений о химическом составе атмосферы.

Первые фундаментальные измерения основных параметров атмосферы Венеры были проведены в 1967 г., когда 18 октября автоматическая станция «Венера-4» совершила свой плавный спуск в атмосфере планеты. Вслед за станцией «Венера-4», на следующий день мимо планеты Венера на расстоянии 3970 км от поверхности пролетел космический



аппарат «Маринер-5», который дал много ценной дополнительной информации, а в ряде случаев позволял уточнить данные, полученные на станции «Венера-4».

Передача научных данных во время спуска станции «Венера-4» (ее спускаемого аппарата) продолжалось 23 мин, вплоть до высоты над поверхностью Венеры 28 км. Однако не исключалось (благодаря особенностям работы радиовысотомера с периодической модуляцией), что высота могла отличаться примерно на 30 км. Такой разброс в привязке данных научных измерений существенно сказался на интерпретации некоторых результатов, полученных со станции «Венера-4».

В январе 1969 г. к планете Венера стартовали космические станции «Венера-5» и «Венера-6», которые 16 и 17 мая совершили плавный спуск в атмосферу планеты. Передача данных со спускаемого аппарата станции «Венера-5» в атмосфере Венеры продолжалась в течение 53 мин, и он провел измерения на участке спуска длиной в 36,7 км, а со спускаемого аппарата «Венера-6» — в течение 51 мин, и он провел измерения на участке спуска длиной в 34,2 км.

Исследования планеты Марс космическими аппаратами начались в 1965 г. 15 июля 1965 г. космический аппарат «Маринер-4» прошел на минимальном расстоянии ~10 000 км от поверхности Марса. После пролета Марса космический аппарат «Маринер-4» вышел на гелиоцентрическую орбиту вокруг Солнца и связь с ним поддерживалась более трех лет. Последний сеанс радиосвязи состоялся 20 декабря 1967 г., когда космический аппарат вновь приблизился к Земле до расстояния менее 50 млн. км. Это позволило принять часть информации, хранившейся на борту космического аппарата.

В 1969 г. к Марсу были запущены автоматические станции «Маринер-6» и «Маринер-7». 31 июля аппарат «Маринер-6» достиг района Марса и прошел мимо него на расстоянии 3430 км, а 5 августа 1969 г. мимо Марса пролетел космический аппарат «Маринер-7».

Изучение атмосферы планет — это проблема огромного научного значения, с которой связано понимание многих закономерностей в происхождении самих планет, динамическом равновесии энергии, поступающей от Солнца и отраженной планетой, возможности возникновения жизни на той или иной планете.

Чтобы наиболее наглядно проиллюстрировать трудности, которые возникают при интерпретации данных об атмосферах планет, воспользуемся одним методическим приемом американского метеоролога Дж. Оринга, который использовал его в качестве ответа на вопрос: каков химический со-

став атмосферы планеты «Х», если известны следующие факты:

1) в атмосфере планеты «Х» содержится углекислый газ, и это единственный газ, который пока удалось обнаружить;

2) масса атмосферы планеты «Х» гораздо больше массы углекислого газа, содержащегося в ней;

3) около 80% атмосферы Земли составляет азот;

4) в космосе в достаточном количестве распространен азот: он обнаружен на таких астрономических телах как Солнце и звезды;

5) практически невозможно непосредственно определить, есть ли азот в атмосфере «Х», так как спектроскопически обнаружить азот при наблюдениях с Земли очень трудно.

Дж. Оринг заключает, что в подобной ситуации логично прийти к выводу, что планета «Х» в основном состоит из азота, а также некоторого количества углекислого газа. Этот вывод подкрепляется двумя обстоятельствами. Во-первых, по аналогии с земной атмосферой, если планета «Х» является соседней к Земле планетой; во-вторых, на основании космической аналогии, так как азот содержится на других небесных телах. Такая постановка проблемы очень типична в отношении планеты Венера: именно до проведения прямых измерений со станции «Венера-4» считалось, что основной газовой компонентой атмосферы Венеры является азот с незначительной примесью ( $\sim 10\%$ ) углекислого газа и других компонент.

Измерения химического состава атмосферы Венера на автоматических станциях «Венера-4», «Венера-5» и «Венера-6» проводились под руководством академика А. П. Виноградова. При первоначальной постановке экспериментов предполагалось, что в атмосфере Венеры в достаточном количестве содержится азот ( $N_2$ ) и кислород ( $O_2$ ). При этом в силу разноречивости данных относительно  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  и  $N_2$  на станции «Венера-4» проводились в основном пороговые измерения. Определение химического состава определялось с помощью 11 газоанализаторов, при этом пять анализаторов сработали при давлении 550 мм рт. ст. и температуре  $\pm 10^\circ C$ , а остальные шесть — при давлении 1500 мм рт. ст. и температуре  $90 \pm 10^\circ C$ .

На станции «Венера-5» и «Венера-6» измерения проводились на участке парашютирования, при этом давление и температура изменялись от 0,6 ат и  $25^\circ C$  до 27 ат и  $320^\circ C$ .

Газоанализаторы представляют собой герметичные цилиндрические датчики давления мембранного типа и в зависимости от конструкции позволяют определять абсолютное давление или разность давлений, возникающих за счет поглощения измеряемой компоненты в одном из объемов датчика. Для каждой из компонент были выбраны соответству-

ющие поглотители. Для углекислого газа — едкое кали с добавлением лития (3%), полнота поглощения при этом достигалась за 35—40 сек. Во избежание ошибки, связанной с поглощением едким кали паров воды, в другом отсеке размещали  $\text{CaH}_2$  для поглощения влаги.

По измерениям на станции «Венера-4» содержание  $\text{CO}_2$  в атмосфере Венеры составило  $\sim 90 \pm 10\%$ . Более точные измерения на станциях «Венера-5» и «Венера-6» существенно уточнили содержание углекислого газа и дали среднее значение  $\sim 97 \pm 4\%$ . Для определения содержания азота использовался циркониевый поглотитель при температуре  $800^\circ\text{C}$ . В качестве нагревателя циркония был применен кварцевый капилляр с вольфрамовой спиралью внутри его для подогрева.

Так как вместе с азотом одновременно поглощаются  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{O}_2$ , то для сразнения в ячейку помещали едкое кали для поглощения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и фосфор — для поглощения  $\text{O}_2$ . Этот метод определения содержания в атмосфере азота был применен на станции «Венера-4».

На станциях «Венера-5» и «Венера-6» использовался более усовершенствованный метод — содержание азота определялось по остаточному давлению после поглощения основных компонент (углекислого газа, паров воды и кислорода). Как показали измерения содержание азота в атмосфере Венеры очень мало:  $\text{N}_2 \leq 2\%$ .

Содержание кислорода определялось двумя способами: манометрическим и термохимическим. В качестве поглотителя использовался красный фосфор, который уже при возгонке дает белый фосфор и хорошо поглощает кислород. Этот метод применялся на станции «Венера-4». Поскольку по результатам первых измерений атмосфера Венеры оказалась очень бедной кислородом, на станциях «Венера-5» и «Венера-6» для пороговых измерений использовался термохимический метод: взаимодействие кислорода с одним из тугоплавких металлов при нагревании. Таким металлом был выбран вольфрам (с добавлением небольшого количества кислорода при давлении в несколько мм рт. ст., во избежание перегорания вольфрама при высоких температурах). В результате измерений было показано, что в атмосфере Венеры содержится  $\text{O}_2 \leq 0,1\%$ . Содержание водяных паров определялось двумя методами: манометрическим (для большого) и электролитическим (для малого количества влаги).

Первым методом измерялась разность давлений после поглощения в одной из ячеек датчика водяного пара хлористым кальцием, а вторым методом измерялась разность электропроводностей после поглощения водяного пара  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Данные измерений показали присутствие воды в атмосфере Венеры, причем с увеличением давления содержание влаги

уменьшается. Содержание воды на уровне конденсации составляло 11 мг/л.

Таким образом, впервые в экспериментальной астрономии удалось получить прямые данные о химическом составе атмосферы Венеры.  $\text{CO}_2$  —  $97 \pm 4\%$ ,  $\text{O}_2$  — не более 0,1%,  $\text{N}_2$  — не более 2%. По данным наземных измерений в атмосфере Венеры обнаружен  $\text{CO}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ .

Измерения плотности, температуры и давления на станции «Венера-4» проводились при помощи термометра сопротивления, плотномера с  $\beta$ -источником и манометра aneroidного типа. Диапазон измерений плотномера составлял  $5 \cdot 10^{-4} \div 1,5 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>. Диапазон измерений манометра aneroidного типа составлял 0,13—7,3 кг/см<sup>2</sup>.

На станциях «Венера-5» и «Венера-6» было установлено по шесть приборов для измерения давления и по три прибора для измерения температуры. В качестве датчиков давления использовались манометры мембранного типа, для измерения температуры — термометры сопротивления, а для измерения плотности применялся плотномер камертонного типа.

Диапазон измерений датчиков давления составлял:

от 100 до 5 000 мм рт. ст.

от 500 до 20 000 мм рт. ст.

от 750 до 30 000 мм рт. ст.

Для надежности измерений датчики давления были дублированы по два на каждый диапазон. Диапазон измерений термометров сопротивления составлял:  $0 \div 160^\circ \text{C}$ ,  $142 \div 370^\circ \text{C}$ ;  $200 \div 440^\circ \text{C}$ . Диапазон измерения плотномера камертонного типа составлял  $0,5 \div 40$  кг/см<sup>3</sup>.

18 октября 1967 г. в 7 часов 40 минут начались измерения в атмосфере Венеры термобарических параметров, которые закончились в 9 часов 14 минут. Измерения плотности и давления велись до зашкаливания приборов, приблизительно до 8 часов 52 минут.

В связи с этим необходимо было экстраполировать значения плотности, которые соответствовали бы последним измерениям температуры. Использовалось несколько экстраполяций: графические по диаграммам «плотность—время» и «энтропия—давление» (при 100%-ном содержании  $\text{CO}_2$ ). В этом случае получено значение  $\rho_0 = 17,3 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho_0 = 17,9 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>.

Предполагая, что в атмосфере Венеры справедливо условие гидростатического равновесия, и применяя законы для идеальных газов, можно провести экстраполяцию пользуясь соотношением:

$$\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^n,$$

где  $n$  — показатель политропы, выбирается по его изменению в конце участка измерения. Другой возможностью для экстраполяции является использование барометрической формулы и уравнения движения спускаемого аппарата в атмосфере Венеры. В этих двух случаях было получено значение  $\rho_0 = 17,2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$  и  $\rho_0 = 16,9 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ . Как видно, все полученные значения хорошо согласуются между собой. Температура на участке измерения изменялась по квазилинейному закону и имела значение:  $\sim 320^\circ \text{ К} \div 530^\circ \text{ К}$ . Измерение значения плотности и температуры дают возможность оценить величину пройденного пути спускаемого аппарата в атмосфере Венеры.

Пройденное расстояние спускаемого аппарата в атмосфере Венеры может быть определено различными методами: по барометрической формуле, по уравнению движения аппарата с вычисленным для данного аппарата отношением  $\frac{C_x}{M}$  ( $C_x$  — коэффициент аэродинамического сопротивления,  $M$  — масса аппарата). При этом очень важно знать устойчива атмосфера или нет. Состояние атмосферы называется устойчивым, если в ней отсутствуют конвективные движения. Для идеального газа условием устойчивости является адиабатический закон изменения температуры с высотой, т. е.  $\frac{\Delta T}{\Delta Z} \leq \frac{g}{C_p}$ , где  $C_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении, т. е. вертикальный градиент температуры меньше адиабатического. Расчеты показали, что на участке спуска между 15 и 27 км, определенным по уравнению движения аппарата с  $\frac{C_x}{M} = 0,00225 \text{ кг}^{-1}$ , атмосфера является неустойчивой. Если исходить из того, что атмосфера на участке спуска находится в устойчивом состоянии и близка к адиабатическому, необходимо несколько изменить значение коэффициента  $\frac{C_x}{M}$ . При значении  $\frac{C_x}{M} = 0,00176 \text{ кг}^{-1}$  пройденный путь спускаемого аппарата соответствует устойчивому состоянию атмосферы и равняется  $Z_{\text{макс}} \sim 28 \pm 1 \text{ км}$ . Скорость движения аппарата при этом изменяется от  $\sim 10 \text{ м/сек}$  в начале участка до  $2-3 \text{ м/сек}$  в конце участка. Анализ устойчивости атмосферы был проведен также по измеренным значениям  $\rho$  и  $T$  независимо от их высотного распределения, и было показано, что атмосфера на участке спуска находится в состоянии, близком к адиабатическому. Важным методом проверки полученных значений  $\rho$ ,  $p$ , и  $T$  является метод внутренней согласованности Обухова—Голицина, основанный на анализе динамики спуска космического аппарата в атмосфере планеты, если известны пары любых из трех термодинамических параметров,

связанных уравнением состояния. Последовательно из уравнения гидростатического равновесия и уравнения движения анндрата можно получить три соотношения:

$$p_1 - p(t) = A \cdot \Phi_1 \{ p(t), p(t_1) \}$$

$$\sqrt{p_1} - \sqrt{p(t)} = B \cdot \Phi_2 \{ T^{-1/2}(t), T^{-1/2}(t_1) \}$$

$$\sqrt{p_1 T_1} - \sqrt{p \cdot T} = C \cdot \Phi_3 \{ T^{-1/2}(t), T^{-1/2}(t_1) \},$$

где  $t_1$  — соответствует последнему измеренному значению параметра, а значение констант  $A, B, C$  определяются следующими соотношениями:

$$A = (2Mg^3/C_x S)^{1/2} = (3,31 \pm 0,02) \cdot 10^4 \text{ г}^{1/2} \text{ см}^{1/2} / \text{сек}^3,$$

$$B = (Mg^3 \cdot \mu / 2C_x SR)^{1/2} = (0,733 \pm 0,003) \text{ град}^{1/2} \cdot \text{атм}^{1/2} / \text{мин},$$

$$C = \frac{\mu}{R} \left( \frac{Mg^3}{2C_x S} \right)^{1/2} = (8,75 \pm 0,12) \cdot 10^{-3} \text{ г}^{1/2} \text{ град} / \text{см}^{3/2} \cdot \text{сек}.$$

Численные значения  $A, B, C$  находились по методу наименьших квадратов.

Если теперь для всех трех пар значений по оси ординат отложить соответствующие их разности, начиная с  $t_1$  — последнего момента измерения, и далее значения измеряемого параметра назад по времени до момента начала измерений, а по оси абсцисс соответствующие значения  $\Phi_i$  в те же моменты времени, то все точки лягут строго на прямую линию, тангенсом угла наклона которой к оси абсцисс будут значения  $A$  либо  $B$  и  $C$ . Это и будет доказательством внутренней согласованности измеренных значений  $p, \rho, T$  при найденных численных значениях  $A, B, C$ . Кроме того, через константы  $A, B$  и  $C$  можно выразить значение молекулярного веса атмосферы:

$$\mu = \frac{2RC}{A} ; \mu = \frac{RC^2}{B^2} ; \mu = \frac{4RB^2}{A^2}$$

$R$  — газовая постоянная.

Для найденных выше значений  $A, B, C$  получим:

$$\mu = \begin{cases} 44,0 \pm 0,9 \\ 44,2 \pm 1,5 \\ 43,7 \pm 0,9 \end{cases}$$

т. е. все значения хорошо согласуются между собой, указывая, что атмосфера Венеры в основном состоит из  $\text{CO}_2$ .

Изучение термодинамических параметров атмосферы Венеры были продолжены на спускаемых аппаратах автоматических станций «Венера-5» и «Венера-6». Обе станции вошли в атмосферу планеты с неосвещенной Солнцем стороны примерно в 2700 км от терминатора. Расстояние между точками входа станций составило около 300 км.

На станциях «Венера-5» и «Венера-6» были проведены более надежные высотомерные измерения. Радиовысотомер включался по команде раскрытия основного парашюта, а сами измерения проводились методом частотной модуляции. В пределах высот от 50 до 10 км отметки высоты осуществлялись независимыми частотными фильтрами. Расчеты пройденного пути спускаемых аппаратов в атмосфере Венеры в зависимости от времени осуществлялись: по уравнению гидростатического равновесия с учетом уравнения состояния газа (при известном составе атмосферы  $\mu=42,3$  и измеренным значением  $\rho$  и  $T$ ); по уравнению квазиравномерного спуска аппаратура на парашюте (Авдеевский и др.).

$$gM \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{ca}}\right) = C_x S \frac{\rho v^2}{2}; \quad z = \sum_{\tau_1}^{\tau_2} v \Delta \tau, \quad ,$$

где  $g \sim 8,8 \text{ м/сек}^2$  — ускорение силы тяжести на Венере,  $M$  — масса спускаемого аппарата,  $\rho_{ca}$  — средняя плотность спускаемого аппарата,  $C_x$  — коэффициент аэродинамического сопротивления,  $S$  — площадь миделя;  $z$ ,  $v$  — пройденный путь и скорость спускаемого аппарата. При расчетах предполагалось постоянство  $C_x$  и, кроме того, принималось  $\frac{C_x}{M} = 1,7 \times 10^{-3} \text{ кг}^{-1}$ .

Расчетные значения скорости имели величины для обоих аппаратов от 32 до 6 м/сек. Расстояния, рассчитанные по уравнению гидростатического равновесия, сопоставлялись с показаниями высотомера между соответствующими моментами времени. Сравнение всех данных показывает, что путь, пройденный «Венерой-5» от момента раскрытия парашюта до момента прекращения связи, равен  $\sim 36,7 \text{ км}$ , а для «Венеры-6»  $\sim 34,2 \text{ км}$ . Измерения параметров  $\rho$  и  $T$  на станции «Венера-5» начались в 9 часов 02 минуты 30 секунд и закончились в 9 часов 54 минуты 56 секунд. На станции «Венера-6» измерения начались в 9 часов 08 минут 15 секунд и закончились в 9 часов 58 минут 15 секунд. Если ввести в рассмотрение средний уровень поверхности Венеры как среднее арифметическое из измерений высоты на станциях «Венера-5» и «Венера-6», то можно установить, что измерения  $\rho$ ,  $\rho$  и  $T$  на обеих станциях закончились на высоте 20 км над указанным уровнем.

Как уже говорилось, на следующий день после входа станции «Венера-4» в атмосферу планеты, мимо нее пролетел космический аппарат «Маринер-5». Метод измерения состава атмосферы Венеры был основан на определении на различных высотах показателя преломления или рефракции, в диапазоне частот 2297 Мгц. На Земле регистрировались изменения частоты, фазы и амплитуды радиосигнала, проходящего через различные слои атмосферы, при заходе космического аппарата за диск планеты и по выходе из-за него.

Как известно, при прохождении радиосигнала через атмосферу планеты может иметь место так называемая критическая рефракция, т. е. в этом случае радиус кривизны радиолуча становится равным радиусу поверхности, на которой показатель преломления принимает постоянное значение. Пучок радиолучей, распространяющийся через уровень критической рефракции и имеющий лучи, проходящие касательно критическому уровню или ниже его, изгибается в сторону планеты. В этот момент на Земле происходит прерывание в приеме радиосигнала. Поэтому по радиозаходу можно определить профиль рефракции только до уровня критической рефракции. Радиорефракция в атмосфере, состоящей, например, из смеси ( $\text{CO}_2\text{—N}_2$ ), определяется выражением:

$$n = (134,9) \frac{P_{\text{CO}_2}}{T} + (80,29) \frac{P_{\text{N}_2}}{T} + (16,57) \left(1 + \frac{5748}{T}\right) \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{T}$$

где  $P$  — парциальное давление.

Условием критической рефракции в сферически симметричной атмосфере служит уравнение:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{n-1}{n \cdot T} \left[ \frac{g\mu}{R} + \frac{\Delta T}{\Delta r} \right],$$

$n$  — показатель преломления.

Используя данные по химическому составу, полученные «Венерой-4», с помощью указанных соотношений, были построены профили рефракции для нижней атмосферы Венеры. Переход от измеренного профиля рефракции к определению полной концентрации  $n^*$  при известном химическом составе для нижней части атмосферы осуществляется по формуле:

$$n^* = \frac{n}{\sum \alpha_i n_i}$$

$n_i$  — объемное содержание  $i$ -го газа,  $\alpha$  — эмпирическая постоянная ( $\alpha_{\text{CO}_2} = 1,184 \cdot 10^{-17}$ ).

Далее, зная полную концентрацию и молекулярный вес, с помощью уравнения гидростатики, можно определить темпе-



ратуру на различных уровнях. При принятом в настоящее время радиусе Венеры  $r_v = 6050$  км, последние данные измерений на «Маринер-5» относятся к высоте 38 км над поверхностью планеты.

После того как были сопоставлены полученные результаты со значением о радиусе поверхности Венеры (данные «Маринер-5» были строго привязаны к гравитационному центру планеты), стало ясно, что последние измерения со станции «Венера-4» относятся не к поверхности планеты, а к высоте 25—30 км над ее поверхностью, что, по-видимому, являлось следствием ложной отметки высотомером высоты 28 км на высотах 50—60 км.

Верхнюю часть полученного профиля рефракции можно связать с электронной концентрацией по формуле:

$$n = -40,3 \cdot 10^6 \frac{Ne}{f^2},$$

где  $f$  — радиочастота, гц.

Таким образом удалось построить распределение электронной концентрации в дневной ионосфере Венеры.

На автоматических станциях «Венера-4, 5, 6» проводилось измерение воды в атмосфере Венеры, которое оказалось равным: 6—11 мг/л (при давлении 2—0,6 ат). Расчет толщины облачного слоя показывает, что он составляет около 15 км. До высоты над уровнем конденсации ~ 7 км облака, по-видимому, состоят из капелек воды, выше — из кристаллов льда. Максимум водности облаков составляет ~ 2,4 г/м<sup>3</sup> при температуре от —5 до —25°С и располагается на 5—10 км выше уровня конденсации. Верхняя граница облаков размыта. (А. П. Виноградов и др.).

Первые прямые данные об атмосфере Марса были получены в 1965 г., когда космический корабль «Маринер-4» пролетел мимо планеты. В качестве метода измерения использовалось радиозатмение космического корабля диском Марса на частоте — 2100 Мгц. Затмение «Маринера-4» продолжалось около часа. На Земле во время захода и восхода точно регистрировались изменения фазы радиосигнала, проходящего через атмосферу Марса. Измерения во время захода и восхода значительно отличались между собой.

В конце июля — начале августа 1969 г., как мы уже упоминали, совершили пролет мимо Марса космические аппараты «Маринер-6» и «Маринер-7». Космические аппараты пролетели мимо Марса на высоте 3425 км. Наблюдения проводились как на дневной, так на ночной сторонах планеты, при этом проводились широкие спектроскопические и радиоизмерения. Спектроскопические измерения верхних слоев атмосферы Марса в ультрафиолетовом диапазоне позволили обна-

ружить углекислый газ, окись углерода, небольшие количества кислорода и водорода. Эти обстоятельства свидетельствуют в пользу гипотезы об отсутствии жизни на Марсе. Температура экзосферы планеты оказалась порядка 400—500° К.

На «Маринер-7» в ультрафиолетовом диапазоне обнаружено резкое увеличение яркости полярной шапки. Этот факт имеет большое значение, так как он говорит о том, что ультрафиолетовая радиация, по-видимому, проникает до поверхности Марса и что отсутствует среда (пыль, облака), которая могли бы поглощать радиацию.

Спектротрические измерения в ИК-диапазоне также показали наличие в атмосфере Марса углекислого газа, который, по-видимому, является главной газовой компонентой. Кроме того, обнаружены спектры твердой углекислоты и водяного пара, который проявляет себя в виде ледяного тумана.

Измерения температуры поверхности Марса в ИК-диапазоне показали, что на экваторе днем она может достигать значения 24°С. Поверхностная температура от дня к ночи совершает перепады от 15—20°С в полдень до —100°С ночью. Минимальная температура Южной полярной шапки ~150° К. Отсюда можно сделать предположение, что марсианские полярные шапки состоят из замерзшей углекислоты, так как для диапазона давлений:  $2 \div 9,5$  мбар температура замерзания  $\text{CO}_2$  колеблется в пределах 140—150° К.

На космических аппаратах «Маринер-6, 7» также был применен метод радиозатмения. Прием радиосигналов осуществлялся одновременно на 63-метровые антенны в Австралии и в США (Калифорнии и Западной Виргинии). Эксперимент проводился на длине волны 12,5 см с когерентной ретрансляцией сигнала с Земли и относительной стабильностью наземного передатчика  $10^{-12}$ . Результаты измерений интерпретировались в предположении сферически-симметричной атмосферы планеты. По полученному профилю рефракции для нижней части атмосферы Марса получены данные о температуре и давлении, считая, что атмосфера целиком состоит из углекислого газа. При этом было определено значение экваториального радиуса Марса  $r = 3393 \pm 6$  км. По этим данным получено значение атмосферного давления у поверхности Марса в пределах:  $3,5 \div 9$  мбар при среднем значении 6,5 мбар. Температура у поверхности достигает значения ~260° К. Полученные значения достаточно хорошо согласуются с ранее полученными данными на «Маринер-4».

## Ионосфера Венеры и Марса

Изучение ионосферы планет Солнечной системы имеет принципиальное значение не только для понимания происхождения атмосфер планет в целом, но важно также с точки зрения обеспечения надежной радиосвязи с космическими аппаратами, совершающими полеты к планетам. Достижение планет Марса и Венеры космическими аппаратами «Маринер-4, 5, 6, 7» и «Венера-4, 5, 6» дали огромный материал для изучения планетных ионосфер и сравнения их с земной ионосферой. При изучении ионосфер планет было использовано два метода: радиозатменный и регистрация ионной составляющей при помощи плазменных зондов. По данным радиозатмения космического аппарата «Маринер-4» планетой получено распределение электронной концентрации в дневной и ночной ионосфере Марса. При этом оказалось:

1. Максимум электронной концентрации в дневной ионосфере Марса на средних широтах находится на высоте 125 км и равен  $N_e \sim 9 \cdot 10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-3}$ .

2. Шкалу высот электронов над максимумом можно считать примерно постоянной и равной 20—25 км.

3. Наблюдается небольшой вторичный максимум на высоте около 20—25 км ниже главного максимума.

4. Электронная концентрация в ночной ионосфере Марса не превышает  $10^4 \text{ см}^{-3}$ .

Эти результаты получены одночастотным методом. В этом случае в силу специфики самих измерений в нижней части атмосферы не удастся однозначно разделить вклады, которые вносятся в величину показателя преломления нейтральными и заряженными частицами. Поэтому профили электронной концентрации ионосферы Марса, полученные в данном эксперименте, следует рассматривать как усредненную картину. Возможно, что локальные измерения будут отличаться от построенных профилей. Профили электронной концентрации, построенные по радиоизмерениям «Маринер-6, 7», зафиксировали в марсианской ионосфере максимум электронной концентрации  $N_e \sim 1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  на высоте 130 км, что на 50% превышает величину максимума, полученную «Маринером-4». По-видимому, в данном случае сказались разные периоды солнечной активности. Плазменная температура ионосферы на высотах 130—190 км оказалась равной  $400 \div 500^\circ \text{K}$ .

Изучение ионосферы Венеры проводилось на космическом аппарате «Маринер-5» и автоматических станциях серии «Венера». На станциях «Венера» изучение ионной составляющей осуществлялось с помощью плоских и полусферических трех-электродных ловушек заряженных частиц. В силу того, что

диапазон измеряемых величин был значительно завышен, удалось получить только верхние пределы ионной концентрации в ночной ионосфере Венеры, которая нигде не превышала  $\sim 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Измерения малых концентраций дали возможность установить верхний предел  $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$  на высотах  $> 300 \text{ км}$ . Полученные профили электронной концентрации радиозатменным методом выявили следующую структуру ионосферы: на дневной стороне имеется максимум концентрации  $\sim 5 \div 6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  на высоте около  $140 \text{ км}$ , имеется также дополнительный максимум на высоте  $\sim 15 \text{ км}$  ниже главного. Если считать основной газовой составляющей углекислый газ, то шкала высот выше главного максимума составит  $\sim 13 \text{ км}$ , что соответствует  $T \approx 300^\circ \text{ К}$ , при этом намечается рост шкалы высот с ростом высоты.

## Модели атмосфер Венеры и Марса

До полетов космических аппаратов к планетам Марса и Венеры различными авторами были построены модели атмосфер планет, однако все они основывались на чисто гипотетических предположениях о химическом составе атмосфер и их структурных параметрах. Прямые измерения основных компонент атмосферы Марса и Венеры, а также температуры и давления позволили впервые количественно рассчитать ряд новых моделей атмосфер. В настоящее время во всех моделях как для Марса, так и для Венеры основной компонентой принимается углекислый газ.

После полета космического корабля «Маринер-4» Чемберлен (Англия) и Клиоре (США) предложили модель верхней атмосферы Марса с областью  $E$  ( $E$  — область ионизации атмосферы солнечными рентгеновскими лучами).

На рис. 1 представлен температурный профиль и профиль концентрации по Чемберлену. При построении профилей принято, что диссоциация углекислоты пренебрежимо мала и происходит полное перемешивание, электронная температура экзосферы  $T = 410^\circ \text{ К}$ . Согласно модели Чемберлена в области термосферы (область, где температура возрастает с высотой) отсутствуют области ионизации  $F_1$  и  $F_2$ , что согласуется с предварительным анализом радиозатменных данных «Маринера-4». (Клиоре и др.).

В модели Джонсона температура у поверхности Марса принимается  $\sim 210^\circ \text{ К}$ , давление  $\sim 8 \text{ мбар}$ , главный максимум ионизации аналогичен слою  $F_2$  в ионосфере Земли, основным ионом в максимуме и над ним является  $\text{O}^+$ . На рис. 2 представлен профиль температуры согласно модели Джонсона. Температурный профиль соответствует трехслойной структуре модели (тропосфера, стратосфера, изотермическая тер-

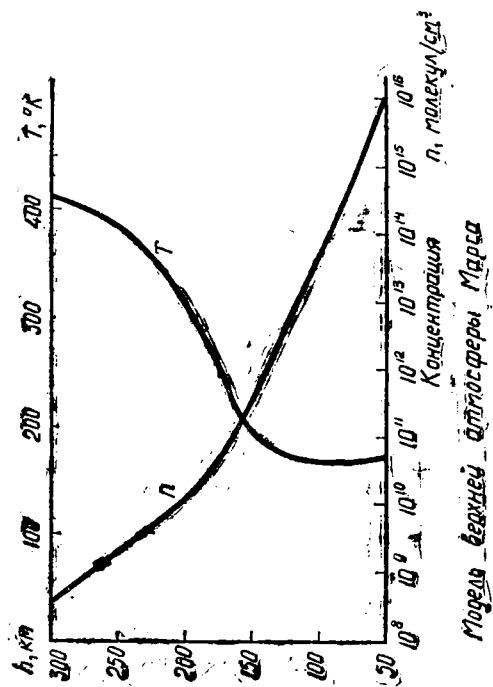
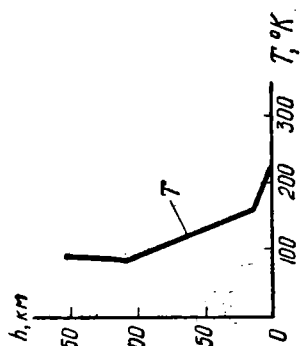


Рис. 1.



Температура нижней атмосферы Марса

Рис. 2.

мосфера). Модель Джонсона подвергалась критике со стороны Чемберлена, который указал, что наличие слоя  $F_2$ , преобладание иона  $O^+$  и низкая температура изотермической термосферы не могут быть согласованы с данными «Маринера-4».

Совершенно иной температурный профиль получен в модели Гросса, Мак-Говерна и Расула (рис. 3), в основу кото-

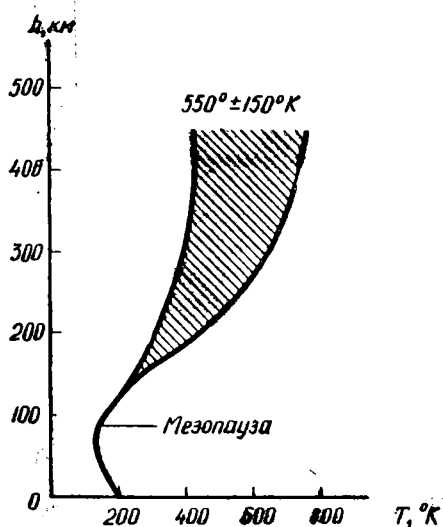


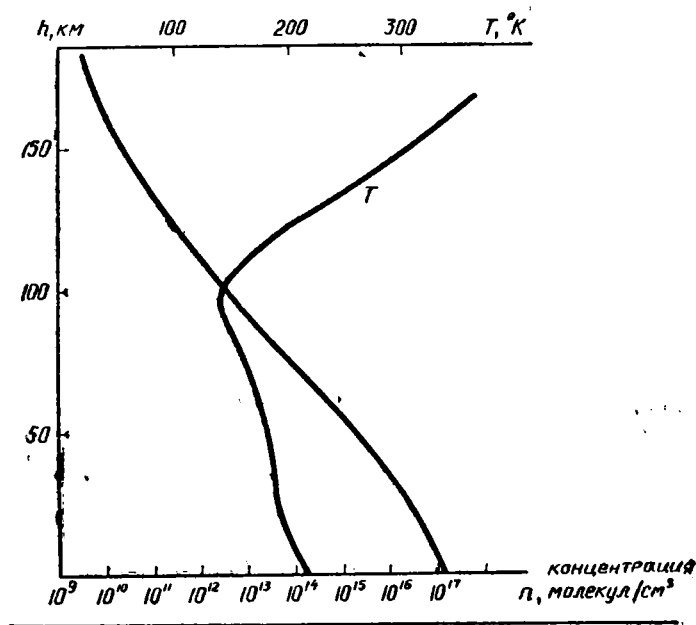
Рис. 3. *Температура верхней атмосферы Марса*

рой положена температура поверхности  $\sim 200^\circ K$ , давление у поверхности  $\sim 8$  мбар. В нижней атмосфере имеет место лучистое равновесие вплоть до высоты 80 км с эффективной диссоциацией углекислого газа. В отличие от модели Джонсона температура экзосферы оказалась равной  $550 \pm 150^\circ K$ , на высоте 80 км имеет место температурный максимум — мезопауза. Чемберлен указал, что если ионизация атомов кислорода происходит радиацией далекого ультрафиолета, то максимум ионизации  $F_2$  должен располагаться выше 125 км, что не согласуется с данными «Маринера-4».

Мак-Элроем была предложена интересная модель атмосферы Марса, состоящая из чистого углекислого газа и находящаяся в термодинамическом равновесии. Мак-Элрой принял, что давление у поверхности равно  $\sim 6,3$  мбар, температура у поверхности  $\sim 160^\circ K$ . Учитывалось, что солнечная

радиация поглощается в ближней инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, перераспределение радиации происходит за счет молекулярной теплопроводности и лучистого переноса в полосе углекислого газа  $\lambda = 15$  мкм.

Температурный градиент до высоты  $\sim 50$  км менее  $1^\circ/\text{км}$ , далее температура растет, на высоте 200 км начинается переход в экзосферу с температурой  $T = 487^\circ \text{K}$ . Температурный профиль и профиль концентрации показаны на рис. 4. Как отмечает сам Мак-Элрой, его модель не может достаточно хорошо объяснить экспериментальный максимум ионизации в атмосфере Марса.



Модель атмосферы Марса, состоящей из чистого углекислого газа ( $\text{CO}_2$ )

Рис. 4.

Советский астрофизик В. И. Мороз построил три модели атмосферы Марса: минимальную, среднюю и максимальную. За исходные данные для построения моделей были приняты начальные значения, представленные в табл. 1.

Эти условия выбирались таким образом, чтобы на любом уровне (по высоте) максимальная и минимальная модели давали максимум и минимум массовой плотности.

Таблица I

| Физические параметры   | Максимальная модель                       | Средняя модель                                      | Минимальная модель   |
|--|---|---|----------------------|
| Давление у поверхности, мб                                       | 20  | 10  | 5                    |
| Химический состав  | 10% CO <sub>2</sub><br>90% N <sub>2</sub> | 50% CO <sub>2</sub><br>25% N <sub>2</sub><br>25% Ar | 100% CO <sub>2</sub> |
| Эффективная температура поверхности, °K                          | 270                                       | 250   | 225                  |
| Средний молекулярный вес ниже уровня диссоциации CO <sub>2</sub> | 29,6                                      | 39  | 44                   |
| Средний молекулярный вес выше уровня диссоциации                 | 26  | 27  | 22                   |
| Градиент температуры над уровнем диссоциации 1°/км               | 1   | 2   | 0                    |

Далее предполагается, что нижняя часть атмосферы полностью перемешана, распределение температуры определяется лучистым переносом в полосах CO<sub>2</sub>, уровень диссоциации CO<sub>2</sub> соответствует уровню фотохимического равновесия, который расположен выше уровня колебательной релаксации полосы CO<sub>2</sub>  $\lambda=15$  мкм. В земной верхней атмосфере температура определяется балансом между потоком ультрафиолетового излучения и потоком тепла, возникающего за счет поглощенной энергии, которая отводится вниз через теплопроводность. В тепловом балансе марсианской атмосферы важную роль играет еще один процесс: излучение в молекулярных полосах CO<sub>2</sub>. В связи с этим принимается, что температура на уровне фотохимического равновесия определяется условием равенства поглощенной энергии ультрафиолетового излучения и энергии, излученной в полосах CO<sub>2</sub>.

Во всех трех моделях были рассчитаны как функции высоты: температура, давление, численная концентрация, плотность, локальная шкала высот для давления. Профили температуры и плотности, соответствующие трем моделям, представлены на рис. 5.

Конвективные процессы в моделях В. И. Мороза имеют место в нижнем слое толщиной 5—7 км, где градиент температуры адиабатический. Конвективная зона в нижней атмосфере Марса рассчитывалась Эммануэлем для различных широт (экватор, 30°, 60°, полюс). Высота конвективной зоны растет с уменьшением широты, при этом она поднимается выше 10 км только на экваторе. Для всех широт температура оказывается одинаковой (~163 °K) на высоте ~ 60 км.

Все рассмотренные модели не могут пока дать однозначного ответа: какому типу ионосферных слоев  $D$ ,  $E$  или  $F_1$ ,  $F_2$  (по аналогии с земными) можно отнести ионосферный слой в атмосфере Марса (рис. 6). Эта трудность связана прежде



всего с отсутствием данных о нейтральном составе атмосферы в области ионосферных высот. Поэтому приходится строить модель нейтральной атмосферы при различных предположениях, описывающих полученное распределение электронной концентрации. Если, например, предположить, что в атмосфере имеет место фотохимическое равновесие, то электронный профиль можно описать моделями типа земных слоев D, E или F<sub>1</sub>. Если предположить, что в силу сильной раз-

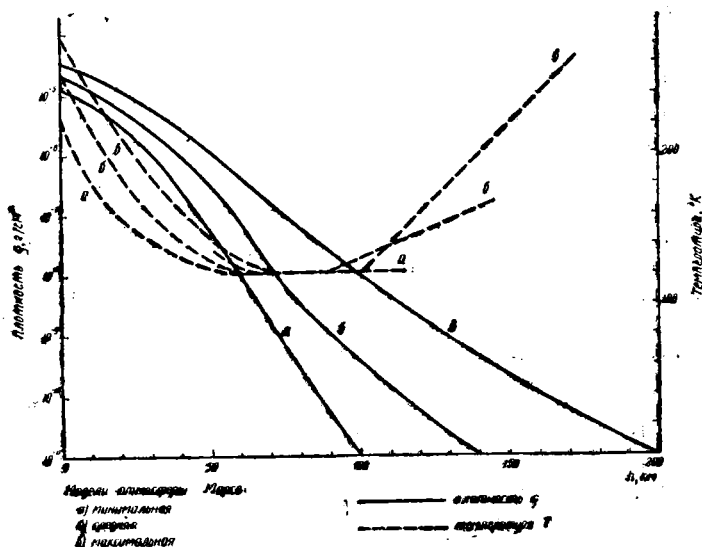


Рис. 5.

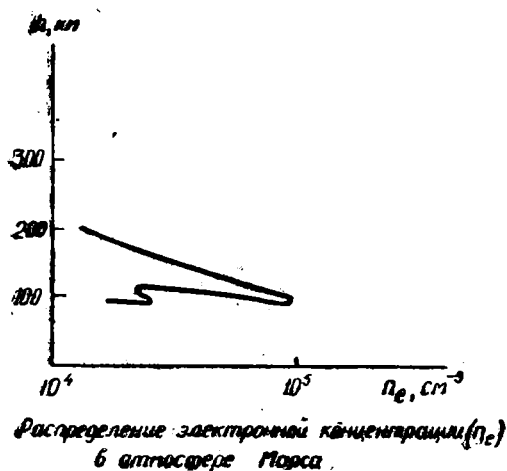
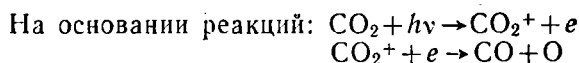


Рис. 6.

реженности атмосферы на ионосферных высотах диффузия молекул становится существенным процессом, то выше некоторого уровня атмосферный кислород должен стать основной компонентой, так как он значительно легче, чем  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$ . В этом случае максимум ионизации в ионосфере Марса можно считать подобным слою  $F_2$ . Отсюда видно, что окончательный выбор модели Марса представляет известные трудности.

Прямые измерения в верхней атмосфере планеты Венера не обнаружили значительной концентрации атомов кислорода. Это позволяет предположить, что максимум ионизации подобен образованию земных слоев  $F_1$  или  $F_2$  с основным ионом  $\text{CO}_2^+$ .



с константой скорости реакции  $K = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{сек}$ , Мак-Элрой построил профиль электронной концентрации для дневной ионосферы (рис. 7), который отличается от экспериментального профиля (по данным «Маринер-5»), менее чем на 30 %.

Полученное согласие теоретических и экспериментальных

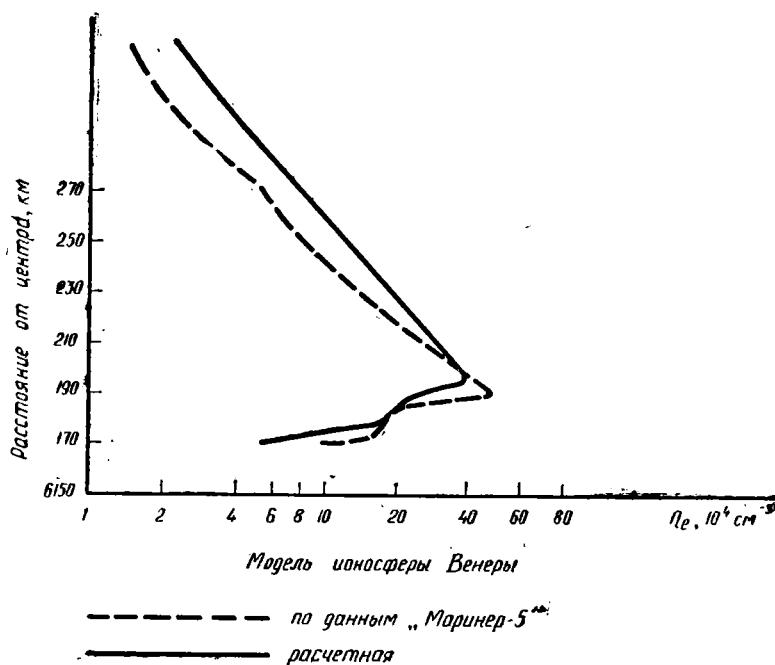


Рис. 7.

данных говорит о том, что модель слоя  $F_1$ , по-видимому, хорошо описывает ионосферный максимум планеты Венера.

Построение количественных моделей атмосферы Венеры на основе данных «Маринер-5» и «Венера-4» было сделано американскими учеными Клиоре и др., Мак-Элроем, К. Саганом и советскими учеными В. И. Морозом, В. В. Михневич, В. С. Авдеевским и др.

Наиболее простой моделью атмосферы Венеры является модель Мак-Элроя, состоящая на 100% из  $\text{CO}_2$ . Для такой модели Мак-Элрой получил профили температуры  $T$  и концентрации  $\rho$ , изображенные на рис. 8. В дальнейшем Мак-Элрой рассмотрел подробно целый ряд моделей (см. табл. 2).

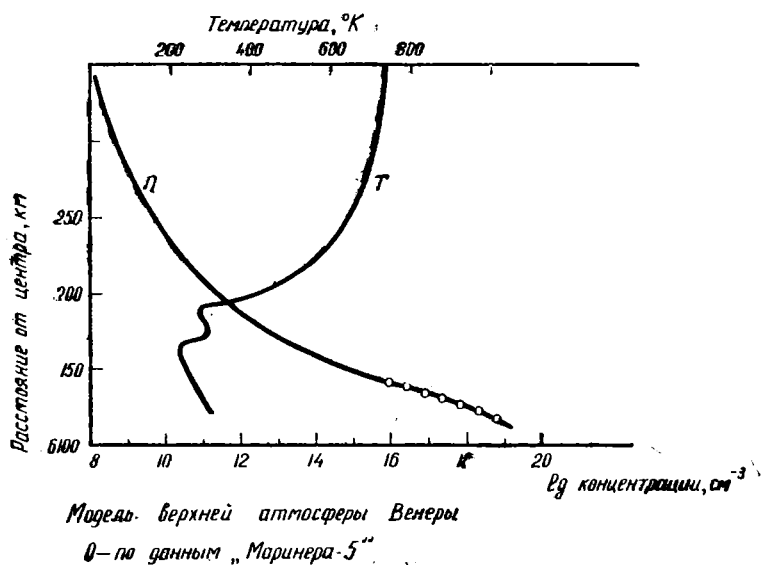


Рис. 8.

Таблица 2

| Модель | Состав нижней атмосферы              | Уровень диффузионного разделения, км | Состав на уровне диффузионного разделения             |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| A      | 75% $\text{CO}_2$ , 25% $\text{N}_2$ | $\infty$                             | —   |
| B      | 75% $\text{CO}_2$ , 25% $\text{N}_2$ | 6195                                 | 75% $\text{CO}_2$ , 25% $\text{N}_2$                  |
| C      | 90% $\text{CO}_2$ , 10% $\text{N}_2$ | 6190                                 | 90% $\text{CO}_2$ , 10% $\text{N}_2$                  |
| D      | 100% $\text{CO}_2$                   | 6185                                 | 80% $\text{CO}_2$ , 10% $\text{CO}$<br>10% $\text{O}$ |
| E      | 100% $\text{CO}_2$                   | 6185                                 | 95% $\text{CO}_2$ , 25% $\text{CO}$<br>5% $\text{O}$  |

На рис. 9 представлены профили температуры и концентрации для моделей *Е* и *Д*.

17 августа 1970 г. в сторону планеты Венера была запущена советская автоматическая станция «Венера-7», которая 15 декабря 1970 г. совершила плавную посадку на поверхность планеты. Во время спуска космического аппарата в атмосфере Венеры удалось провести измерения температуры вплоть до самой поверхности и на самой поверхности.

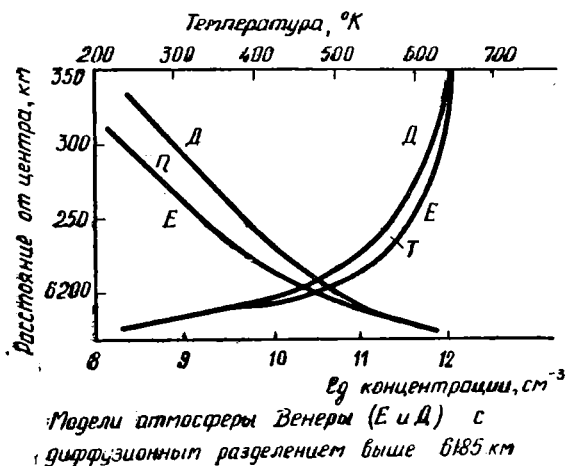


Рис. 9.

Значения атмосферных параметров на поверхности планеты в месте посадки спускаемого аппарата составляют:

температура:  $748 \pm 20^\circ \text{K}$ ,

давление:  $90 \pm 15 \text{ ат}$ .

Совокупность данных, полученных на станциях «Венера-4, 5, 6, 7» и «Маринер-5», а также с учетом наземных данных, позволила построить уточненную модель распределения давления (*Р*) и температуры (*Т*) атмосферы Венеры (Авдеевский и др.), представленную на рис. 10.

Согласно этой модели температура падает от  $750 \pm 20^\circ \text{K}$  у поверхности до  $190^\circ \text{K}$  на высоте 105 км, где располагается область мезопаузы. Термосфера Венеры (область положительного изменения температурного градиента) для условий средней солнечной активности имеет температуру  $650\text{—}700^\circ \text{K}$ . Слой облаков, предположительно состоящий из ледяных кри-

сталликов примерно микронного размера, располагается в области высот 60—70 км.

В настоящее время советским астрофизиком В. И. Морозом предложена модель, содержащая распределение температуры ( $T$ ), давления ( $P$ ), плотность ( $\rho$ ), концентрации ( $n$ ) и состава ( $\mu$ ) в атмосфере Венеры.

Зависимости давления и температуры  $T(h)$  и  $P(h)$ , которые получены из прямых измерений на космических аппаратах «Венера-5» и «Венера-6», экстраполируются в нижнюю часть атмосферы по адиабате, а в верхнюю—согласно модели Мак-Элроя. В. И. Мороз принимает основными компонентами атмосферы Венеры следующие: 90%  $\text{CO}_2$  и 10%  $\text{N}_2$  (молекулярный вес  $\mu=42,4$ ). На уровне диффузионного разделения ( $h=140$  км) принимается: 90%  $\text{CO}_2$ ; 10%  $\text{N}_2$ ; 0,02%  $\text{He}$ ;  $1,2 \cdot 10^{-4}$  %  $\text{D}$ ;  $8 \cdot 10^{-6}$  %  $\text{H}$ .

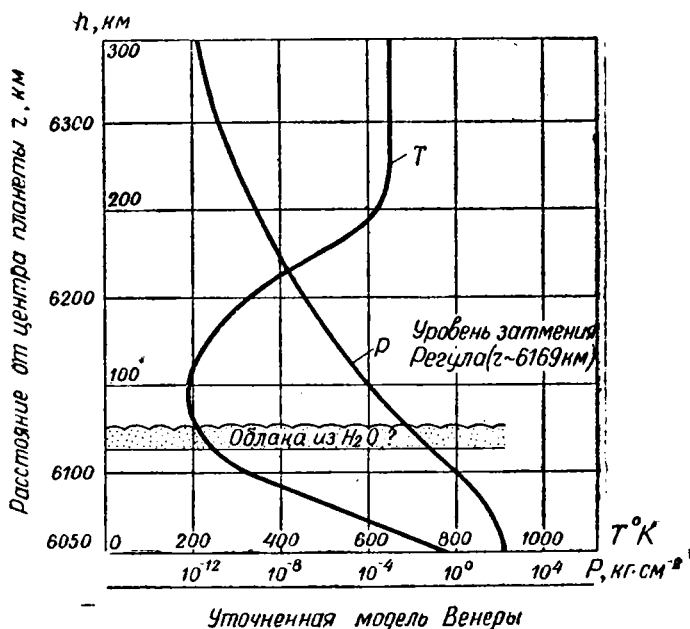


Рис. 10.

Модель, которая построена В. И. Морозом от поверхности планеты до высоты 6000 км, нами приводится до уровня верхней границы облачного покрова (табл. 3).

Таблица 3

## Рабочая модель атмосферы Венеры (В. И. Мороз)

| Высо-<br>та | Тем-<br>пера-<br>тура | Плотность                  | Давление            | Концентра-<br>ция    | Сред-<br>ний моле-<br>куляр-<br>ный<br>вес | Примечание  |
|-------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|--|---|
| h, км       | T, °K                 | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | P, ат               | n, см <sup>-3</sup>  | $\mu$ , см <sup>-3</sup>                   |   |
| 0           | 750                   | $6,3 \cdot 10^{-2}$        | 93,0                | $8,8 \cdot 10^{20}$  | 42,4                                       | Поверхность   |
| 5           | 713                   | 5,0                        | 69,0                | 7,0                  | 42,4                                       |   |
| 10          | 675                   | 3,8                        | 50,3                | 5,4                  | 42,4                                       |   |
| 15          | 636                   | 2,8                        | 35,0                | 4,0                  | 42,4                                       |   |
| 20          | 596                   | 2,18                       | 25,2                | 3,07                 | 42,4                                       | Конец работы станций «Венера-5» и «Венера-6»              |
| 25          | 556                   | 1,58                       | 17,3                | 2,23                 | 42,4                                       |   |
| 30          | 515                   | 1,15                       | 11,5                | 1,62                 | 42,4                                       |   |
| 35          | 472                   | $8,10 \cdot 10^{-3}$       | 7,40                | 1,14                 | 42,4                                       |   |
| 40          | 428                   | 5,50                       | 4,50                | $7,74 \cdot 10^{15}$ | 42,4                                       |   |
| 45          | 382                   | 3,58                       | 2,60                | 5,05                 | 42,4                                       |   |
| 50          | 340                   | 2,16                       | 1,43                | 3,04                 | 42,4                                       |   |
| 55          | 304                   | 1,25                       | 0,71                | 1,70                 | 42,4                                       | Начало работы станций «Венера-4», «Венера-5» и «Венера-6» |
| 60          | 274                   | $6,6 \cdot 10^{-4}$        | 0,34                | $9,0 \cdot 10^{16}$  | 42,4                                       |   |
| 65          | 250                   | 2,7                        | 0,14                | 3,6                  | 42,4                                       | Верхняя граница облачного слоя                            |
| 70          | 240                   | 1,2                        | $5,5 \cdot 10^{-2}$ | 1,6                  | 42,4                                       |   |
| 80          | 220                   | $1,7 \cdot 10^{-5}$        | $7,0 \cdot 10^{-3}$ | $2,3 \cdot 10^{17}$  | 42,4                                       |   |
| 90          | 200                   | $1,9 \cdot 10^{-6}$        | $7,4 \cdot 10^{-4}$ | $2,6 \cdot 10^{16}$  | 42,4                                       |   |
| 100         | 180                   | $1,8 \cdot 10^{-7}$        | $6,2 \cdot 10^{-5}$ | $2,5 \cdot 10^{15}$  | 42,4                                       |   |

Рабочая модель В. И. Мороза хорошо согласуется с лучшими экспериментальными данными.

## Исследование поверхности Луны и механических свойств ее пород

Космические полеты к Луне начались в январе 1959 г., когда был осуществлен запуск первой лунной ракеты «Луна-1». Станция «Луна-1» прошла в непосредственной близости от Луны на расстоянии около 6000 км от ее поверхности. После пролета мимо Луны станция вышла на орбиту спутника Солнца и стала первой искусственной планетой Солнечной системы. В сентябре 1959 г. новый старт к Луне и автоматическая станция «Луна-2» достигает поверхности Луны.

В октябре 1959 г. космическая станция «Луна-3» совершает свой исторический облет Луны, в результате чего впервые были переданы на Землю фототелевизионным способом фотографии обратной, невидимой с Земли, части поверхности Луны. В июле 1965 г. был осуществлен пуск космической ракеты с автоматической станцией «Зонд-3». Фототелевизионное устройство станции было использовано для фотографирования поверхности Луны, в частности, той части ее невидимой стороны, которая осталась небхваченной при съемке, произведенной ранее с помощью станции «Луна-3».

В этот же период времени полеты к Луне с жесткой посадкой космических аппаратов на ее поверхность осуществлялись по американской программе «Рейнджер». Фотографирование поверхности Луны совершалось при подлете космических аппаратов к Луне.

В 1966 г. начался новый этап в изучении Луны космическими аппаратами — осуществление мягкой посадки на ее поверхность автоматических станций и создание искусственных спутников Луны.

В феврале и декабре 1966 г. автоматические станции «Луна-9» и «Луна-13» совершили мягкую посадку на лунную поверхность в районе Океана Бурь. Со станции были переданы на Землю лунные панорамные снимки, позволившие впервые получить данные о микроструктуре лунного грунта и изучить морфологические особенности лунной поверхности. Кроме того, с помощью ряда приборов (грунтомера, динамографа радиационного плотномера) станция «Луна-13» провела прямые измерения физико-механических свойств лунного грунта.

Автоматическая станция «Луна-10» стала первым искусственным спутником Луны в апреле 1966 г. Последовавшие за ней станции «Луна-11, 12, 14» позволили решить ряд принципиальных вопросов в строении Луны, составе ее пород, поверхностных свойств лунного грунта. В 1968—1969 гг. космические аппараты серии «Зонд» совершили облет Луны и доставили на Землю результаты научных исследований.

В течение 1966—1968 гг. было запущено семь американских космических аппаратов «Сервейер». Пять из них совершили мягкую посадку на поверхность Луны. Посадка аппаратов совершалась в различных районах, что имело важное значение для получения данных о свойствах лунных пород. В это же время на селеноцентрическую орбиту было выведено пять американских космических аппаратов «Лунар Орбитер», передавших на Землю значительное число снимков лунной поверхности.

Огромным событием в истории человечества явились полеты американских космонавтов на Луну, доставивших первые образцы лунного грунта для их изучения на Землю.

21 июля 1969 г. в 5 часов 56 минут человек Земли — американский космонавт Нейл Армстронг впервые ступил на поверхность Луны в районе Моря Спокойствия. Через 15 мин к Нейлу Армстронгу присоединился Эдвин Олдрин. Выход космонавтов из лунной кабины и первые шаги на Луне транслировались по телевидению.

Эпоха космических исследований — это непрерывная погоня за удивительным. Для того чтобы пройти путь от первых полетов автоматических станций к Луне до первого маленького шага человека Земли по Луне, но огромного шага для всего человечества, нужна была необыкновенная созидательная работа, приведшая к созданию мощнейших ракетных двигателей, самой ракеты, уникальных систем управления, системы ориентации, систем жизнеобеспечения, автоматических систем для возвращения космического корабля на Землю. Необходима была героическая Одиссея по отработке всех элементов космического корабля на орбитах вокруг Земли и Луны. Если все это измерено масштабом времени всего в несколько лет, то легко себе представить, каким техническим потенциалом обладает человечество для осуществления своих самых дерзновенных замыслов.

Однако Удивительное заключается не только в том, что человек открывает, но также и в том, какими средствами. Техническая и конструкторская мысль в каждом космическом эксперименте ищет оптимальное решение задачи, выдвигая на первый план решение кардинального вопроса: человек или автомат. Безопасность, экономичность, надежность и эффективность — основные научно-технические критерии при создании любого космического аппарата.

Уже сейчас можно высказать мысль о том, что полеты пилотируемых космических кораблей на долгий период времени будут уступать в экономичности, надежности и эффективности автоматическим станциям при длительных полетах на сверхдальние расстояния. Тот факт, что невозможно создать пилотируемый корабль в несколько сот килограммов, красноречиво говорит о том, что полеты к планетам будут продолжаться исключительно при помощи автоматических станций. Безусловно, создание и полеты пилотируемых кораблей на околоземных или даже окололунных орбитах сыграют огромную роль в решении многих научных и народнохозяйственных задач. В то же время уже сама статистика космических полетов убедительно доказывает, какими средствами лучше всего пользоваться для исследования космоса: приблизительно на каждый пилотируемый полет приходится 20—30 автоматических. Это соотношение одинаково для двух крупнейших космических держав — СССР и США.

Роль космических автоматов в изучении небесных тел Солнечной системы была великолепно доказана полетами



станции «Луна-16», автоматической станции нового типа, открывшей принципиально новые пути исследования космоса.

Автоматическая станция «Луна-16» была запущена 12 сентября 1970 г. После полета по промежуточной орбите искусственного спутника Земли через 70 мин после старта был включен двигатель последней ступени, и станция начала полет по траектории к Луне. Все операции, которые предстояло провести станции при подлете к Луне, в момент посадки на ее поверхность, работа бурового устройства, взятие лунного грунта, и, наконец, старт с Луны — все это было заложено в логическую систему станции непосредственно на Земле и управлялось по команде с Земли.

При полете станции «Луна-16» к Луне была произведена всего одна коррекция — исправление траектории полета, 17 сентября станция достигла заданного района Луны, система ориентации перевела станцию в положение, необходимое для включения тормозного двигателя. После окончания работы двигателя «Луна-16» вышла на селеноцентрическую орбиту с высотой в апоселении в 110 км. Завершив заключительные маневры на окололунной орбите, станция вышла на предпосадочную орбиту с высотой в переселении в 15 км и высотой в апоселении в 110 км. 20 сентября в 8 часов 18 минут станция начала снижаться, чтобы совершить мягкую посадку на лунную поверхность. При снижении станция находилась в строго определенном положении, которое создавалось стабилизирующими органами системы управления. Скорость спуска и высота над лунной поверхностью строго контролировались. На высоте 20 м, когда был включен основной двигатель посадочной ступени, начался прецезионный режим спуска с помощью двигателей малой тяги, которые обеспечили посадку станции на лунную поверхность практически с нулевой скоростью.

После посадки станции было точно определено ее местоположение в Море Изобилия. Затем начались работы с грунтозаборным устройством. Управление работой грунтозаборного устройства осуществлялось оператором по команде с Земли. Операции проводились в следующей последовательности: сначала был открыт замок, фиксирующий грунтозаборное устройство в полете, и штанга с буровым станком заняла вертикальное положение; затем был осуществлен разворот штанги на 180°.

Эта операция обеспечивала отвод штанги в горизонтальное положение, разворот рабочей части корпуса бурового станка в сторону лунной поверхности. Последняя операция завершилась контактом штанги с лунной поверхностью.

Бурение лунного грунта производилось специальным буром. Скорость бурения и ее контроль позволили оценить прочность грунта в месте бурения. После окончания работы

бур с лунным материалом был отведен к специальному контейнеру, находящемуся в возвращаемом аппарате, и отделен от бурового станка. Контейнер с лунным грунтом был загерметизирован. Так была завершена первая и главная стадия работ станции «Луна-16» по автоматическому забору лунного грунта.

Второй этап — старт с Луны — был не менее ответственным, и по технической сложности является уникальным примером применения систем автоматического управления в космических исследованиях.

На борт взлетной ступени были переданы величина скорости, которую должна приобрести станция при взлете с Луны, заданы параметры системам ориентации и управления для выхода станции на траекторию полета к Земле и другие параметры. Полет на трассе «Луна—Земля» совершался по баллистической траектории. При подлете к Земле был отделен приборный отсек от возвращаемого аппарата, который вошел в плотные слои атмосферы со второй космической скоростью. Теплозащитные устройства обеспечили сохранность возвращаемого аппарата от высоких температур. Несмотря на огромные перегрузки, аппаратура возвращаемого аппарата работала нормально. На высоте 14,5 км открылся тормозной, а затем основной парашюты, включилось пеленгационное устройство, с помощью которого удалось проследить спуск аппарата на поверхность Земли вплоть до момента посадки.

24 сентября в 8 часов 26 минут возвращаемый аппарат совершил посадку в восьмидесяти километрах юго-восточнее города Джезказгана. Поисковая группа извлекла контейнер с лунным грунтом из возвращаемого аппарата и доставила его в специальную лабораторию Академии наук СССР для тщательного анализа. Так завершился исторический полет станции «Луна-16». Впервые в мировой космонавтике с помощью автоматического аппарата удалось достичь поверхности другого небесного тела Солнечной системы, совершить посадку, произвести взятие грунта, стартовать с поверхности и возвратиться на Землю.

Исследование Луны автоматическими аппаратами было продолжено запуском 10 ноября 1970 г. космической станции «Луна-17».

17 ноября станция «Луна-17» совершила мягкую посадку на лунную поверхность в районе Моря Дождей. На посадочной ступени установлен лунный самоходный аппарат «Луноход-1». После посадки, проверки функционирования бортовых систем станции и осмотра лунной поверхности по команде с Земли 17 ноября в 9 часов 28 минут московского времени со станции «Луна-17» по специальному трапу сошел автоматический аппарат «Луноход-1», Передвижение по Лу-

не самоходного аппарата осуществлялось с помощью восьмиколесного шасси. На борту лунохода и посадочной ступени установлены флаги и выпелы с изображением Государственного герба Советского Союза и барельефом В. И. Ленина.

«Луноход-1» оборудован различной научной аппаратурой: фототелевизионной для передачи на землю панорамных снимков, рентгеновским телескопом, счетчиками космических лучей, приборами для изучения свойств лунного грунта. В соответствии с советско-французским соглашением о сотрудничестве в изучении и освоении космического пространства в мирных целях на борту лунохода установлен французский отражатель для лазерной локации Луны.

Создание «Лунохода-1» — крупнейшее достижение советской ракетно-космической техники, которое открывает широкие возможности не только для непосредственного изучения Луны, но, используя Луну как опорную базу, позволят проводить разнообразные астрономические исследования без атмосферных помех. Так, шаг за шагом, осваивается новый мир, который будет принадлежать всему человечеству.

Полеты космических аппаратов и космических кораблей на Луну в течение десяти лет обогатили человечество таким объемом знаний, который на много превышает все то, что было ранее известно о Луне. Первые фундаментальные сведения были получены в результате фотографирования лунной поверхности и особенно изучения панорамных снимков, переданных на Землю космическими аппаратами «Луна-9, 13» и «Сервейер». Дешифрирование фотографий выявило многие особенности строения обратной стороны Луны: материковый характер поверхности с повышенной плотностью кратеров и отсутствием обширных морских районов. На основе полученных фотографий была распространена единая система селенографических координат на оба полушария Луны.

В 1960 г. в СССР был издан первый «Атлас обратной стороны Луны», в котором помещена первая в истории изучения Луны карта обратной стороны Луны в масштабе 1:10 000 000, содержащая около 400 наиболее крупных образований, расположенных в восточной и центральных частях Луны. В 1967 г. в СССР издана вторая часть «Атласа обратной стороны Луны», в котором помещена карта лунной поверхности западной части невидимого полушария в масштабе 1:5 000 000 на девяти листах. На каждой фотографии нанесена сетка селенографических координат и обозначены особыми значками опорные пункты.

На основе материалов, полученных станциями «Луна-3» и «Зонд-3» и современных фотографических атласов Луны, в СССР составлена первая карта всей поверхности Луны в масштабе 1:5 000 000, полный глобус Луны в масштабе

1 : 10 000 000 и фотографическая карта видимой стороны Луны в масштабе 1 : 5 000 000.

Круговые панорамы лунной поверхности, полученные при различных высотах Солнца, позволили увидеть рельеф Луны, так как его увидел бы человек, находящийся непосредственно на Луне: разрешение изображений составляло порядка миллиметра. Поверхность Луны оказалась очень шероховатой и имеет много мелких углублений и бугорков. Разбросаны отдельные образования типа камней размером около 15 см и более крупные. На снимках отчетливо видны углубления, составляющие несколько метров. Поверхность Луны покрыта слоем слабосвязанного разнородного материала серовато-коричневого цвета. Еще более рыхлый тонкий слой пыли обнаружен на дневной части лунной поверхности. Пыль поднимается под действием газовых струй тормозных реактивных двигателей при посадке космических аппаратов на поверхность Луны.

Нейл Армстронг передавал на Землю: «Я проваливаюсь в грунт всего на какую-то долю дюйма... но я отчетливо вижу следы своих ног». Верхний слой лунного грунта оказался непрочным, легко поддающимся пенетрации, т. е. проникновению в него. Толщина его также оказалась различной. Основанием поверхностного слоя служат твердые горные породы или крупные обломки. Горные породы могут быть расположены весьма близко к поверхности Луны и даже выходить непосредственно на ее поверхность. Вся поверхность Луны находится в особых условиях, совершенно невоспроизводимых на Земле: космический вакуум, непрерывное обдувание солнечным ветром, воздействие ультрафиолетового излучения и ряд других факторов.

Это приводит к тому, что мелкие частицы лунного грунта под влиянием межмолекулярных сил могут слипаться в более крупные, они могут налипать при соприкосновении на поверхность других тел, существенно меняя их оптические свойства.

Объемный вес верхнего слоя лунной поверхности в пределах 15—20 см равен 1,0—1,5 г/см<sup>3</sup>, угол внутреннего трения грунта, или сопротивление сдвигу, составляет от 30 до 40°; сцепление в пределах верхних нескольких сантиметров поверхностного слоя составляет ~ 0,0013—0,0120 кг/см<sup>2</sup>, статическая несущая способность на той же глубине порядка 0,18—0,68 кг/см<sup>2</sup>, а на самой поверхности на порядок ниже. Коэффициент пористости 0,87—1,01, что соответствует самой пористости материала 46,5% ÷ 50,1%.

Изучение химического состава лунных пород началось при помощи гамма-спектрометра, установленного на первом искусственном спутнике Луны — станции «Луна-10». Гамма-спектрометрические измерения Луны связаны с присутстви-

ем в лунных породах радиоактивных элементов: тория, урана, изотопа калий-40. Изучение полученных гамма-спектров позволило группе советских ученых во главе с академиком А. П. Виноградовым прийти к фундаментальному выводу: количество радиоактивных элементов в лунном веществе соответствует содержанию их в земных породах основного состава — базальтам. Такой вывод сделан в отношении лунных морей.

С помощью рентгеновского фотометра, установленного на космической станции «Луна-12», удалось обнаружить сравнительно слабое рентгеновское излучение, исходящее от поверхности Луны, и установить его природу.

Это излучение испускается атомами магния и алюминия, содержащихся в лунном грунте, возбужденное под действием коротковолновой солнечной радиации (С. Л. Мандельштам).

Поэлементный химический анализ лунного вещества был произведен на космических аппаратах «Сервейер-5, 6, 7» с помощью анализа альфа и протонного излучений лунных пород, возбужденных специальным источником. В окончательном итоговом отчете по программе «Сервейер» приведены данные по химическому составу лунных пород.

Таблица 4

| Химические элементы | Содержание атомов в % |         |              |              |
|---------------------|-----------------------|---------|--------------|--------------|
|                     | «Сервейер-5»          |         | «Сервейер-6» | «Сервейер-7» |
|                     | проба-1               | проба-2 |              | проба-1      |
| Углерод             | <3                    | <3      | <2           | <2           |
| Кислород            | 58±5                  | 56±5    | 57±5         | 58±5         |
| Натрий              | <2                    | <2      | <2           | <3           |
| Магний              | 3±3                   | 3±3     | 3±3          | 4±3          |
| Алюминий            | 6,5±2                 | 6,5±2   | 6,5±2        | 9±3          |
| Кремний             | 18,5±2                | 19±3    | 22±4         | 18±4         |
| Группа кальция      | —                     | —       | 6±2          | 6±2          |
| Группа железа       | —                     | —       | 5±2          | 2±1          |

Новый этап в экспериментальном изучении Луны начался после посадки на ее поверхность экипажей космических кораблей «Аполлон-11» и «Аполлон-12» в районе Моря Спокойствия и Океана Бурь. Экипажи кораблей собрали на лунной поверхности образцы лунных камней и мелкодисперсного вещества и в специальных контейнерах доставили их на Землю.

Третий район, откуда был доставлен лунный материал на Землю с помощью станции «Луна-16», — Море Изобилия.

«Аполлон-11» совершил посадку на лунную поверхность

в юго-западной части Моря Спокойствия (селенографические координаты: 0,67° с. ш. и 23,49° в. д.).

Анализ лунного грунта прежде всего подтвердил все основные выводы о его составе, структуре и механических свойствах, полученные до этого с помощью автоматических космических аппаратов. Вместе с тем непосредственное изучение лунных пород в лабораторных условиях позволило получить ряд новых интересных данных. (Результаты предварительного изучения лунного материала, доставленного американскими космонавтами, опубликованы в журнале «Science», 167, № 3918, 167, № 3923 за 1970 г.). Удалось различить четыре основных типа пород: мелкозернистые пористые изверженные породы (тип А), крупнозернистые изверженные породы (тип В), брекчия (обломки изверженных пород и минералов, многие из которых подвергнуты расплавлению в результате метеоритных ударов) и реголит (мелкие частицы, пыль). Первые три породы оказались одинаковыми по своему химическому составу. Что касается реголита, то эта порода оказалась содержащей примеси метеоритного вещества и, очевидно, вещества, характерного для лунных материков. Анализ показал, что породы из Моря Спокойствия («Аполлон-11») содержат: 40—45% кислорода, 17—21% кальция, 4—7% алюминия, приблизительно 4—6% титана и магния, что вызвало сенсацию в научном мире. Однако породы, доставленные из Океана Бурь («Аполлон-12»), содержали в среднем в 2—3 раза меньше титана, имеют меньше натрия, циркония, бария и рубидия.

В то же время в них обнаружено несколько больше магния, кобальта, ванадия и скандия. Таким образом, по составу основных пороодообразующих элементов состав лунного грунта из разных районов Луны мало отличается.

Если говорить о совпадении или различии химического состава лунных и земных пород, то все исследованные образцы оказались отличным от земных. Дело в том, что при сравнении горных пород необходимо учитывать не только химический состав, но и входящие в них основные минералы, их содержание, структуру. Основными минералами лунных пород являются ильменит, плагиоклаз и клинопироксен, в незначительных количествах — оливин. Однако по размеру зернистости лунные породы значительно отличаются. Например, зерна оливина — до 0,5 мм, размер зерен других минералов колеблется между 0,05 и 0,2 мм в диаметре. Все рассматриваемые породы, за исключением непрозрачных минералов (ильменит), напоминают некоторые земные оливинсодержащие базальты.

Размер зерен в породах типа В изменяется от 0,2 до 0,3 мм. Частицы стекла, составляющие основную массу брекчий, напоминают стекло тонкого лунного материала. Отмече-

на неоднородность стекла, слагающего частицы, что совершенно не характерно для земных вулканических стекол. В лунных образцах, особенно в рыхлом и тонкозернистом материале и брекчиях, присутствуют следы ударного метаморфизма. В то же время кристаллические породы во внутренних частях не затронуты ударным метаморфизмом. Многие особенности в рыхлом материале и брекчиях, по-видимому, связаны с плавлением материала при сильном ударе.

Особый интерес представляет поверхностный слой лунного вещества — лунная пыль. Как показали исследования, ее основными составляющими являются: осколки пород и обломки кристаллов, темное стекло, содержащее многочисленные железистоникелевые включения, прозрачное стекло однородного состава. Чем меньше размер частиц пыли, тем больше в них стеклянного материала. Находясь в глубоком космическом вакууме, при отсутствии воды и кислорода, частицы лунной пыли способны слипаться (так называемая адгезия). Однако несущая способность пыли невысока из-за большого числа стеклянных шариков среди ее частиц, которые создают низкое сопротивление трения.

## Физические свойства лунных пород

Проводились опыты по определению остаточной и наведенной намагниченности лунных пород. Для образца лунной брекнии остаточная намагниченность оказалась равной  $7,7 \times 10^{-3}$  ед. СГСМ/г, а наведенная намагниченность в поле 0,92 эрстед равной  $7,6 \cdot 10^{-3}$  ед. СГСМ/г. Термомагнитные исследования (по величине точки Кюри) показали для лунных пород нескольких фаз: железа с  $\sim 1\%$  Ni (изверженные породы), железа с  $\sim 5-10\%$  Ni и с  $\geq 33\%$  Ni (метеоритные), а также ильменита.

Точка Кюри для образцов лунного пузырчатого базальта, мелкозернистого базальта и ряда других пород оказалось в интервале 680—780 °K, остаточная намагниченность:  $8,4 \cdot 10^{-5} \div 0,3 \cdot 10^{-5}$  ед. СГСМ/г. Методами палеомагнетизма изучался образец брекнии (18,5 г). В результате было обнаружено, что остаточная намагниченность  $\sim 3,7 \cdot 10^{-4}$  ед. СГСМ/г, объемная магнитная восприимчивость  $\sim 6,3 \cdot 10^{-8}$  ед. СГС, точка Кюри  $\sim 750$  °K.

Для различных пород и образцов мелкораздробленного вещества определялись их магнито-резонансные свойства. Опыты проводились на частотах 9 и 35 гц при различных температурах. На этих частотах вещество имело сильное поглощение при  $g=2$ , где  $g=h\nu/\beta H$  с шириной линии  $\sim 950$  гс. Подобный резонанс вызывается ионами железа с сильными обменными взаимодействиями. Обнаружены резонансы, вы-

званные другими ионами, а также изучен ряд важных магнито-резонансных свойств лунного вещества.

В лунных образцах обнаружена естественная термолюминесценция, пик свечения которой для мелкоизмельченного вещества и брекчий находился при температуре  $\sim 350^\circ\text{K}$ , а для кристаллических пород при  $T \geq 400^\circ\text{K}$ . Обнаружено, что основным носителем термолюминесценции является минерал плагиоклаз. Полная энергия термолюминесценции оказалась равной  $\sim 8 \cdot 10^{-9}$  кал/г для мелкоизмельченных пород и  $\sim 2 \cdot 10^{-9}$  для брекчий. По кривым свечения было показано, что суточная температурная волна на Луне проникает на глубину  $\sim 10,5$  см. Лунная пыль, облученная протонами с энергией  $\sim 60$  Кэв, дает слабую люминесценцию, но она не обнаруживается при облучении ультрафиолетом. У брекчий люминесценция наблюдается в обоих случаях. Ни пыль, ни обломки не обнаруживают естественной или возбужденной термолюминесценции.

Люминесценция изучалась на шести различных лунных образцах. Эффективность возбуждения люминесценции оказалась очень малой. При протонном и ультрафиолетовом облучении величина эффективности возбуждения  $\geq 10^{-6}$ . Если это значение типично для Луны, то обнаружение люминесценции лунной поверхности, по-видимому, практически невозможно.

Поляризационные свойства пыли в Море Спокойствия оказались идентичны тем, которые были обнаружены по наземным наблюдениям.

На лунных образцах (порошок, брекчия, кристаллическая порода) измерялась отражательная способность в диапазоне волн  $\lambda 0,5\text{--}2,0$  мкм и в видимых лучах при углах падения до  $60^\circ$ , а также определялась теплопроводность вещества в диапазоне температур  $200\text{--}400^\circ\text{K}$  в вакууме. При этом было обнаружено, что отражательная способность в видимых лучах растет при увеличении угла наблюдения, спектральная отражательная способность порошка и базальта монотонно растет с увеличением длины волны, в спектре отражения для брекчий четко выявляются минимумы при  $\lambda 1$  мкм и  $> 2$  мкм, а для кристаллических пород — только при  $\lambda 1$  мкм. Теплопроводность порошка с  $\rho = 1,265$  г/см<sup>3</sup> оказалась равной  $\sim 1,71 \cdot 10^{-3}$  вт/м<sup>2</sup> K при  $205^\circ\text{K}$ ;  $2,07 \cdot 10^{-3}$  при  $299^\circ\text{K}$  и  $2,42 \cdot 10^{-3}$  при  $404^\circ\text{K}$ . Поглощательные свойства лунных пород исследовались в инфракрасном диапазоне волн  $\lambda 2\text{--}2000$  мкм.

Проведены измерения удельной теплоемкости и теплопроводности образцов. Теплоемкость брекчий оказалась равной  $0,20 \pm 0,02$  кал  $\cdot$  г<sup>-1</sup>  $\cdot$   $^\circ\text{K}^{-1}$ , а теплопроводность для мелкоизмельченного вещества —  $2,5 \cdot 10^{-6}$  кал  $\cdot$  см<sup>-1</sup>  $\cdot$   $^\circ\text{K}^{-1}$   $\cdot$  сек<sup>-1</sup>, у кристаллических пород и брекчий  $\sim (0,5\text{--}2,0) \cdot 10^{-3}$  кал  $\cdot$  X<sup>-1</sup>.



$\times \text{см}^{-1} \cdot ^\circ \text{K}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$ , что значительно ниже, чем у земных пород. При атмосферном давлении и температуре  $0^\circ$  удельная теплопроводность и тепловая инерция у мелкозернистой, пузырчатой кристаллической породы оказались равными соответственно:  $3,87 \cdot 10^{-3} \text{ кал/см. сек. град.}$  и  $22 \text{ см}^2 \cdot \text{сек}^{1/2} \times \text{град/кал}$ , брекчии —  $1,66 \cdot 10^{-3}$  и 40. Удельная теплоемкость при температуре от  $90$  до  $350^\circ \text{K}$  для пузырчатой базальтоподобной породы и мелкораздробленного материала оказались весьма близкими: от  $0,06 \text{ кал.} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$  при  $T=90^\circ \text{K}$  до  $0,2 \text{ кал.} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$  при  $T=350^\circ \text{K}$ . Отсюда для комбинации параметров  $\gamma = (\kappa \rho c)^{-1/2}$ , где  $\kappa$  — теплопроводность,  $\rho$  — плотность,  $c$  — теплоемкость, получены значения от 34,33 при  $T=100^\circ \text{K}$  до 19,41 при  $T=350^\circ \text{K}$  для базальтовой породы и от 1543 до 898 для мелкораздробленного материала.

Изучение упругих свойств лунных пород очень важно с точки зрения внутреннего строения Луны. Глубинное изучение Луны возможно, например, путем изучения распространения сейсмических колебаний, их скорости, которые выражаются через коэффициент упругости:  $v_p \rho^{1/2} = (\lambda + 2\mu)^{1/2} \times v_s \rho^{1/2} = \mu^{1/2}$  ( $\lambda, \mu$  — упругие постоянные). На лунных образцах были измерены скорости продольных ( $P$ ) и поперечных ( $S$ ) упругих волн при давлениях до 5 кбар. Результаты измерений представлены в табл. 5.

Таблица 5

| Образец                     | Волна | Давление, кбар |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|-------|----------------|------|------|------|------|------|------|
|                             |       | 0,0            | 0,5  | 1,0  | 2,0  | 3,0  | 4,0  | 5,0  |
| $\rho = 3,8 \text{ г/см}^3$ | $P$   | 3,50           | 4,80 | 5,55 | 6,30 | 6,80 | 7,00 | 7,20 |
|                             | $S$   | 2,20           | 2,88 | 3,25 | 3,67 | 3,87 | 4,00 | 4,08 |
| $\rho = 2,8 \text{ г/см}^3$ | $P$   | 2,82           | 3,80 | 4,65 | 5,62 | 6,18 | 6,52 | 6,78 |
|                             | $S$   | 1,70           | 2,45 | 2,82 | 3,20 | 3,39 | 3,50 | 3,62 |
| $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$ | $P$   | 1,50           | 2,90 | 3,50 | 4,05 | 4,30 | 4,40 | 4,50 |
|                             | $S$   | 1,05           | 1,70 | 2,00 | 2,28 | 2,42 | 2,65 | 2,78 |

Как показали измерения, при давлениях меньше 0,2 кбар очень велик коэффициент затухания для сейсмических волн ( $Q=10$ ).

Поиски органического вещества показали, что его содержание не превышает  $\sim 10^{-4}\% - 10^{-5}\%$ . В изученных материалах не обнаружено каких-либо объектов, представляющих биологический интерес.

Сформулируем кратко выводы, к которым пришли амери-

канские ученые на основе предварительного анализа лунных пород, доставленных на Землю экипажем космического корабля «Аполлон-11».

1. По минералогическому составу и структуре лунные породы делятся на две группы:

а) мелко- и среднезернистые кристаллические породы изверженного происхождения. Изверженные породы являются базальтами, состоящими из пироксена, плагиоклаза, ильменита, оливина и кристобалита. Кристаллизация этих пород происходила в очень сухих сильно восстановительных условиях ( $P \sim 10^{-33}$  ат). Температурный интервал кристаллизации  $1210-1060^\circ$ . Кристаллизация изверженных пород происходила от  $3 \cdot 10^9$  до  $4 \cdot 10^9$  лет назад, породы находились на глубине не более 1 метра от поверхности в период от  $20 \cdot 10^6$  до  $160 \cdot 10^6$  лет. Кристаллические породы по минеральному и валовому химическому составу несколько отличаются от лунных земных пород и метеоритов.

б) брекчии со сложной историей.

2. На поверхности Луны происходят процессы эрозии. Скорость поверхностной эрозии камней оценивается в  $10^{-7}$  см/год. Не обнаружено никаких признаков водной эрозии. Таким образом, потребуются многие миллионы лет, чтобы, например, космический корабль на Луне превратился в пыль.

3. Отсутствуют вторичные водосодержащие минералы, т. е. с момента образования пород в месте посадки корабля «Аполлон-11» воды никогда не было.

4. На лунные породы и тонкий материал имело место воздействие ударного метаморфизма.

5. Почти во всех лунных породах отмечены следы бомбардировки их поверхности небольшими частицами.

6. Тонкий материал и брекчии содержат в достаточном количестве благородные газы, захваченные из солнечного ветра.

7. Изучение треков ядерных частиц и наведенной радиоактивности образцов показывает, что бомбардировка лунной поверхности частицами солнечного ветра (а также галактическими космическими лучами) была равномерной без заметных вариаций в течение длительного периода времени.

8. Радиационный возраст пород  $\geq 10 \cdot 10^6$  лет на глубине нескольких сантиметров и  $\geq 500 \cdot 10^6$  лет на глубине 1—2 метра.

9. Все исследованные породы и грунт по своему химическому составу очень сходны между собой.

10. По набору элементов лунные породы мало отличаются от земных пород и метеоритов, однако по составу существуют значительные различия: лунные породы обогащены

элементами, образующими тугоплавкие соединения и обеднены щелочами.

11. Концентрации урана и тория близки к таковым в земных базальтах. Однако отношение калий/уран =  $2400 \div 3200$  необычайно низок для лунных пород по сравнению с хондритами (45 000) и с земными породами (10 000). Можно предполагать постоянную величину этого отношения для Луны в целом.

12. Содержание углерода в образцах  $(50 \div 25) \cdot 10^{-6}$  г/г.

13. Не обнаружено никаких признаков биологического материала в лунных породах.

14. По своим механическим характеристикам лунные породы очень близки к тем, что были получены ранее с помощью автоматических аппаратов.

15. Теплопроводность пылевого слоя оказалась примерно в 1000 раз меньше, чем коренных пород.

16. Изучены оптические, электромагнитные, теплофизические свойства лунного вещества. Установлена принципиальная возможность образования сейсмического волновода в верхних слоях Луны.

Какие наиболее существенные открытия и выводы были сделаны на основе полученных результатов:

1. Открытие эрозийных процессов на Луне.

2. Отсутствие аналогов среди земных пород лунным породам по их химическому составу.

3. Установление древнего возраста изверженных лунных пород, т. е. некоторые лунные породы кристаллизовались раньше древнейших земных пород.

19 ноября 1969 г. в районе Океана Бурь совершил посадку космический корабль «Аполлон-12» примерно в 120 км к юго-востоку от кратера Лансберг с координатами  $23^{\circ}34'$  з. д. и  $2^{\circ}45'$  ю. ш.

Место посадки находится на широком луче кратера Коперник.

Во время пребывания на Луне космонавты собрали 45 кг образцов лунных пород, которые затем на Земле были подвергнуты физическому, химическому, минералогическому и биологическому анализу.

Основной вывод, к которому пришли американские ученые, сводится к следующему: свойства лунных пород, доставленные из Моря Спокойствия, в основном совпадают со свойствами лунных пород, доставленных из Океана Бурь, за исключением:

1. Кристаллические породы из Океана Бурь характеризуются более широкими вариациями как по структуре, так и минералогическому составу.

2. Изверженные породы из Океана Бурь, по-видимому,

являются частями единой интрузивной серии, либо представляют ряд аналогичных серий.

3. Относительное содержание брекчии в Океане Бурь ниже, чем из Моря Спокойствия, так же как мощность реголита в Океане Бурь вдвое меньше, чем в Море Спокойствия. В то же время стратификация реголита из Океана Бурь более сложна.

4. Углерода содержится больше в брекчиях и мелкораздробленном материале, чем в кристаллических породах.

5. Количество органического материала очень мало  $(1-20) \cdot 10^{-6} \%$ .

6. Содержание инертных газов, которые образуются в результате воздействия солнечного ветра с лунной поверхностью, — в брекчиях и мелкораздробленном материале меньше в Океане Бурь по сравнению с Морем Спокойствия.

7. Обломки лунных пород находились на глубине менее одного метра от поверхности в течение 1—200 млн. лет.

8. Процесс кристаллизации в породах происходил от  $1,7 \cdot 10^9$  до  $2,7 \cdot 10^9$  лет назад.

9. Брекчии и тонкораздробленный материал по своему химическому составу очень близки, однако количества титана в них вдвое меньше, чем из Моря Спокойствия.

10. Материал, доставленный из Океана Бурь, моложе материала из Моря Спокойствия. Определение калий-аргонного возраста дает оценку в один миллиард лет, что в общем согласуется с геологическими данными. Этот результат говорит о том, что моря на Луне образовывались в течение длительного периода времени.

Третий район, откуда был доставлен лунный материал на Землю космическим аппаратом «Луна-16», является Море Изобилия. Лунный грунт был взят станцией в точке с координатами  $0^{\circ}41'$  ю. ш. и  $56^{\circ}18'$  в. д., приблизительно в 900 км к востоку от района посадки корабля «Аполлон-11» и 2500 км от места посадки «Аполлон-12». Лунный грунт был доставлен на Землю в виде сыпучего вещества, который в целом представляет собой разнотернистый темно-серый порошок. Только у основания забоя, на глубине 35 см, вещество сложено из крупнозернистого материала. Общий вес колонки грунта составил несколько более 100 г.

Материал лунного грунта легко слипается в отдельные рыхлые образования, что отличает его от земной бесструктурной пыли. Он напоминает собой влажный песок или комковатую структуру земных почв. Зернистость грунта по длине колонки увеличивается с глубиной и по этому признаку можно выделить несколько зон, которые сменяют друг друга: зона тонкозернистого материала с малым содержанием грубых фракций (0—15 см длины колонки); зона разнотернистого материала с включением обломков пород и других

частиц размером более 3 мм (15—33 см длины колонки); зона крупнозернистого материала (33—35 см длины колонки). Первой зоной в основном определяются оптические свойства лунной поверхности. Средний объемный вес грунта в естественном залегании по глубине погружения бура был определен в 1,2 г/см<sup>3</sup>, а при утряске — 1,8 г/см<sup>3</sup>. Отсюда пористость грунта на глубине 35 см была определена в 50—60%.

Из более крупных фракций выделены и исследуются целый ряд групп частиц: базальтовые породы, полевошпатные, осадочные материалы, застывшие капли-шарики, брекчия, слезки, стекла, стекловидные и ошлакованные частицы, частицы металлического железа. По химическому составу вещества лунного грунта представляют размельченную горную породу базальтового типа. В составе лунных пород, доставленных станцией «Луна-16», уже определено 70 химических элементов и изотопные определения. Химический анализ базальтовой породы и тонкой фракции лунного материала, доставленного «Луной-16», и его сравнение с лунным материалом, доставленным «Аполлоном-12», дается в табл. 6.

Таблица 6

| Состав                         | Базальтовая порода «Луна-16» | Тонкая фракция «Луна-16» | Базальтовая порода «Аполлон-12» | Тонкая фракция «Аполлон-12» |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 43,8                         | 41,7                     | 40                              | 42                          |
| TiO <sub>2</sub>               | 4,9                          | 3,39                     | 3,7                             | 3,1                         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13,65                        | 15,32                    | 11,2                            | 14                          |
| FeO                            | 19,35                        | 16,8                     | 21,3                            | 17                          |
| MgO                            | 7,05                         | 8,73                     | 11,7                            | 12                          |
| CaO                            | 10,4                         | 12,2                     | 10,7                            | 10                          |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,33                         | 0,37                     | 0,45                            | 0,4                         |
| K <sub>2</sub> O               | 0,15                         | 0,10                     | 0,065                           | 0,18                        |
| MnO                            | 0,2                          | 0,21                     | 0,26                            | 0,25                        |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,28                         | 0,31                     | 0,55                            | 0,41                        |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,04                         | 0,015                    | 0,023                           | 0,09                        |

Если сравнивать по химическому составу лунные породы, доставленные космонавтами «Аполлонов» и станцией «Луна-16», то все же оказывается, что последние ближе к лунному материалу, доставленному космонавтами «Аполлона-12», как это видно непосредственно из табл. 6.

Вопрос о происхождении лунных пород все еще остается трудным, однако уже можно говорить о роли тех или иных процессов, имевших место в истории Луны. Как пишет академик А. П. Виноградов, «...кристаллические породы поверхности лунных морей одного базальтового типа, но несколько отличающиеся по содержанию некоторых химических элементов. Их состав приближается к составу примитивных базальтов Земли. Лунные моря являются равнинами, затопленными

когда-то вулканической дало. Горные породы типа базальтов образуются как наиболее легкая часть при зонном проплавлении внутреннего вещества планеты. Можно полагать, что общий ход дифференциации вещества Земли и Луны и вероятно других планет земного типа шел сходными путями, хотя и достиг разных этапов развития»<sup>1</sup>.

## Гипотезы происхождения Луны

По-прежнему одной из волнующих космогонических загадок является вопрос о происхождении Луны. В разное время были выдвинуты три теории, на основе которых трактовалось происхождение Луны. Согласно первой теории Луна образовалась одновременно с Землей из одного газового или пылевого космического облака. Луна по сравнению со своим центральным телом (Землей) является наибольшим по массе спутником из всех спутников планет Солнечной системы.

В силу этого удивительного обстоятельства Луна и Земля рассматривались как двойная планета, но механизм образования такой двойной планеты разработать не удалось, что привело к тому, что теория об одновременном образовании Луны и Земли в настоящее время разделяется немногими астрономами и планетоведами.

В начале нашего века выдающийся ученый астроном и математик Джордж Дарвин (сын великого биолога Чарльза Дарвина) выдвинул интересную теорию происхождения Луны, основанную на исследовании фигур равновесия вращающейся жидкой массы. Известно, что эта проблема является классической проблемой механики, которой занимались крупнейшие механики — аналитики (Маклорен, Клеро, Якоби, Пуанкаре и др.). При медленном вращении масса жидкости принимает форму сфероида, сплюснутого по оси вращения, а при очень быстром — фигуру, напоминающую грушу, так называемая грушевидная фигура вращения. Дж. Дарвин показал, что шейка грушевидной фигуры при дальнейшей эволюции утончается, образуется гантеленоподобное тело с двумя центрами (фигура Пуанкаре), и наступает разрыв массы, что, по мнению Дж. Дарвина, является моментом отделения Луны от Земли. Однако при этом не был решен строго вопрос об устойчивости грушевидных фигур вращения.

Дж. Дарвин в своих исследованиях опирался на работы, выполненные знаменитым французским математиком Анри Пуанкаре о фигурах равновесия вращающихся жидких тел.

<sup>1</sup> Более подробно вопрос о происхождении лунных пород рассмотрен академиком А. П. Виноградовым в журнале «Геология», № 1, 1970.

Оба ученые, Дж. Дарвин и А. Пуанкаре в своих исследованиях пришли к выводу, что могут существовать грушевидные фигуры равновесия. При этом разрыв шейки, т. е. разделение двух центров и самостоятельное существование образовавшихся тел, возможно только в том случае, если грушевидная фигура устойчива.

Одновременно с Дж. Дарвином и А. Пуанкаре проблемой фигур равновесия вращающихся жидких тел занимался великий русский математик Александр Михайлович Ляпунов. Эту проблему перед ним поставил другой замечательный русский ученый П. Л. Чебышев. А. М. Ляпунов до конца решил поставленную проблему и показал, что грушевидные фигуры равновесия неустойчивы. Между Дарвином и Пуанкаре, с одной стороны, и А. М. Ляпуновым — с другой, завязался спор, который окончательно был решен в пользу русского ученого английским астрономом Дж. Джинсом в 1916 г., доказавшим невозможность существования грушевидной фигуры. Механизм отделения Луны от Земли, предложенный Дж. Дарвином, оказался неприемлемым. В этом случае отделившийся второй центр (Луна) не смог бы собраться в единую массу и был бы рассеян в пространстве.

Автором третьей теории происхождения Луны является известный шведский астрофизик, лауреат Нобелевской премии Х. Альфвен. Х. Альфвен предполагает, что Луна вначале была самостоятельным небесным телом и вместе с астероидами вращалась вокруг Солнца. В какой-то момент времени Луна приблизилась к Земле и в силу приливных явлений, вызванных притяжением Земли, на Луне произошли изменения ее осевого вращения. В дальнейшем притяжение Земли и Солнца изменили орбиту движения Луны и она стала спутником Земли. Для обоснования теории Х. Альфвена необходимы многие физические и химические данные о строении Луны и планет Солнечной системы.

Идея образования Луны в Солнечной системе отдельно от Земли и захват ее Землей поддерживается Гарольдом Юри, крупнейшим геохимиком, лауреатом Нобелевской премии. Г. Юри считает, что по сравнению с планетами земной группы Луна является первичным телом.

Таким образом, мы видим, что проблема происхождения Луны является крупнейшей космогонической проблемой. Результаты, которые получены в настоящее время в изучении Луны космическими аппаратами, существенно сузили границы возможных гипотез, но они не позволяют решить всех проблем. Изучение внутреннего строения Луны, выяснение происхождения лунных пород, установление точного возраста Луны покажут, к какому типу планет или спутников принадлежит Луна, что может послужить ключом к решению

великой проблемы — происхождения всей нашей Солнечной системы.

## Фотографирование поверхности Марса

14 июля 1965 г. космический аппарат «Маринер-4» приблизился к планете Марс на расстояние около 30 000 км. С Земли на борт аппарата была подана команда к разогреву телевизионной сканирующей системы. На расстоянии 16 800 км планетный датчик по отраженному от Марса солнечному свету включил фотоаппаратуру. В течение 26 мин было получено 22 фотографии марсианской поверхности. За это время «Маринер-4» приблизился к планете до 11 800 км. Через 18 мин после окончания сеанса фотографирования космический аппарат находился на наикратчайшем расстоянии от Марса ~ 9850 км. Еще через 1 час 18 минут «Маринер-4» скрылся за диском планеты и связь с аппаратом прекратилась на 54 минуты. Медленная передача изображений поверхности Марса началась через 11 часов с момента получения последней фотографии. Снимки передавались в двоичном ходе со скоростью ~ 8,33 бит/сек. Время передачи одного снимка занимало 8,66 ч. 24 июля 1965 г. все снимки с борта космического аппарата «Маринер-4» были переданы на Землю. Для передачи каждого снимка требовалось 240 000 двоичных единиц информации.

Медленная скорость передачи была обусловлена огромным расстоянием от Земли (более 214 млн. км), на котором находился космический аппарат. Снимки поверхности Марса передавались через красный или зеленый фильтры. Всего удалось сфотографировать ~ 1% поверхности планеты общей площадью около 1 500 000 км<sup>2</sup>. Длина полосы сканирования равнялась приблизительно 6500 км и прошла через экватор из Северного полушария в Южное. Во время фотографирования освещенность менялась от полной подсолнечной освещенности до полной темноты. Фотографии были дешифрованы группой сотрудников Лаборатории реактивных двигателей (Пассадена) во главе с Лейтоном. Наиболее интересными оказались 11 снимков — от № 5 до № 15. На снимке № 5 впервые были обнаружены марсианские кратеры, аналогичные тем, что наблюдаются на поверхности Луны. Это открытие принадлежит к числу крупнейших научных достижений нашего века. На снимке № 11 обнаружен кратер, имеющий размер около 180 км в поперечнике, а также видны кратеры размерами до 5 км в диаметре. Вся площадь занимает примерно 270×240 км.

На других снимках обнаружены кратеры с валами, открытыми инеем (в Южном полушарии в это время была зи-



ма). Полет космического аппарата «Маринер-4» существенно стимулировал продолжение исследований Марса фотографическими методами.

В 1968 г. к планете Марс были направлены космические аппараты «Маринер-6, 7», которые соответственно 31 июля и 5 августа 1969 г. достигли района Марса и осуществили фотографирование его поверхности. Фототелевизионная система была значительно усовершенствована, на несколько порядков увеличена скорость передачи данных ( $\sim 16,2 \cdot 10^3$  бит/сек), на борту космических аппаратов находилось по две камеры А и В (А — с фокусным расстоянием  $f=52$  мм и В — с фокусным расстоянием  $f=508$  мм).

На «Маринере-6» с помощью узкоугольной телевизионной камеры при дальнем сближении с планетой было получено 33 изображения всего диска планеты, затем еще 17 изображений. В течение 18 мин в период близкого сближения (6000 км) фотографирование проводилось попеременно камерами А и В в основном экваториальной зоны Марса. Число изображений, полученных при близком сближении двумя камерами, составило 26.

С помощью фототелевизионной аппаратуры космического аппарата «Маринер-7» получено 93 изображения при дальнем сближении и 33 при близком сближении. Кроме того, осуществлялся режим прямого приема изображений. В этом режиме было получено более 1000 полезных изображений, переданных с борта «Маринер-6, 7».

Анализ фотографий поверхности Марса, полученных при пролете планеты космических аппаратов «Маринер-4, 6, 7», открыл новую, неожиданную для астрономов картину строения марсианской поверхности: она оказалась заполненной кратерами различного размера, во многом напоминающей поверхность Луны. На Марсе можно выделить три группы областей, отличающихся по своему строению: 1) области, заполненные кратерами, 2) области с хаотическими структурами, 3) бесструктурные зоны.

На Марсе на основании данных космических фотографий не обнаруживается непрерывного перехода в размерах кратеров, что существенно отличает марсианские кратеры от лунных. Возможной причиной этой особенности является выветривание и перенос частиц грунта. Другой важной особенностью рельефа марсианской поверхности является ее слоистость и неоднородность (переход от областей с большим числом кратеров к областям, где кратеров почти нет). Можно предполагать, что бесструктурные зоны на Марсе являются аналогом земных пустынь. Структура марсианской поверхности не обнаруживает каких-либо типичных особенностей (например, структур с резко отличным альбедо). Отмечается, что в зоне хаотических структур полностью отсутствуют

кратеры. На основании анализа фототелевизионных изображений группа американских ученых во главе с Лейтоном высказывает некоторые соображения относительно эволюции Марса как планеты.

На поверхности Марса отсутствуют некоторые формы рельефа, которые были бы связаны с воздействием внутренних сил. Такие силы, действующие на Земле, существенно преобразовали и продолжают преобразовывать земную поверхность. Отсюда можно предположить, что на Марсе никогда не могла возникнуть атмосфера земного типа, если считать, что на Земле она образовалась в связи с тектоническими процессами дифференциации земной коры.

На Марсе обнаружено большое количество крупных кратеров хорошо сохранивших свои очертания и формы. Это говорит о том, что они возникли почти одновременно и не подвергались водной эрозии, т. е. на Марсе, по-видимому, никогда не было больших количеств воды. С другой стороны, необходимо отметить, что на Марсе кратеров размером до 20—50 км в диаметре значительно меньше, чем на Луне. Поэтому можно полагать, что влияние эрозии сказалось существенным образом в хаотических и бесструктурных областях, где, по неизвестным причинам, большие кратеры были «стерты».

Изучение Луны и планет Солнечной системы космическими аппаратами успешно продолжается, особенно это стало наглядным после великолепных полетов автоматических станций «Луна-16» и «Луна-17». Посадка на поверхность Луны лунохода с автономной системой навигации и управление движением открывает огромные перспективы изучения дальних небесных тел и, по-видимому, станет генеральной линией развития космонавтики на ближайшие десятилетия. Можно с полным правом сказать, что успехи ракетно-космической техники заложили основы нового направления в науке — экспериментальной астрономии и планетологии.

## **Выстрел во Вселенную — проект «Гранд Тур»**

В настоящее время разрабатываются различные проекты для дальнейшего исследования Луны и планет Солнечной системы, включая планеты неземной группы — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон.

Высадка космонавтов на Луну, успешное решение проблемы автоматической доставки лунного материала на Землю, создание луноходов — все это позволяет в настоящее время серьезно говорить об освоении Луны и ее детальном изу-

чения. Одним из перспективных направлений в освоении Луны является создание лунных экспедиций с использованием луноходов, управляемых космонавтами или дистанционно по командам с Земли. Использование луноходов значительно расширит возможности изучения самых различных районов лунной поверхности. Проектные и конструкторские разработки предусматривают создание луноходов с экипажем и без экипажа. С помощью луноходов с экипажем возможно решение следующих задач:

1. Топографическая съемка элементов лунного рельефа.
2. Изучение геологического строения поверхности.
3. Бурение скважин на глубину 1÷1,5 м и геологическое изучение подповерхностного слоя.

4. Магнитные и гравитационные исследования.

5. Геохимические исследования (регистрация гамма-излучения на поверхности и в скважинах на глубине 1÷1,5 м).

Современные методы автоматического управления позволяют создание луноходов без экипажа, которым будет доступно решение сложнейших задач на Луне, куда входит передача на Землю телевизионных панорам во время движения, а также в местах остановок в наиболее интересных районах, вертикальное сканирование выше и ниже горизонта; сбор геологических образцов, включая пробы с глубины 1÷1,5 м изучение магнитных свойств пород при помощи профицимера, анализ образцов при помощи рентгеновского дифрактометра (идентификация минералов) и спектрометра (определение элементного состава минералов); расстановка сейсмографов для изучения тектонической деятельности Луны и регистрации числа ударов метеоритов о лунную поверхность, гравиметрические исследования.

В настоящее время ряд американских фирм, по рекомендации НАСА, приступили к предварительным разработкам. Луноходы, проектируемые, например фирмами «Бендикс» и «Дженерал Моторс», получают название LRV (Lunar Roving Vehicle — лунный вездеход).

В течение ближайшего десятилетия будут продолжены исследования Марса и Венеры автоматическими аппаратами. По американской программе уже в 1971 г. предполагается создание около Марса искусственных спутников с периодом обращения 12 ч. Искусственные спутники Марса позволят решить ряд узловых вопросов в изучении Марса: увеличение и сокращение размеров «полярных шапок», продвижение «волны потемнения», образование и исчезновение облаков и пылевых бурь. На станциях будет установлена фототелевизионная аппаратура для съемки поверхности Марса, при этом планируется снять ~ 70% поверхности с разрешением около 1 км. Одной из основных задач этого космического эксперимента является получение данных для выбора районов по-

садки спускаемых аппаратов серии «Викинг». В настоящее время известны некоторые проектные весовые характеристики этого космического аппарата. Общий вес его составит 3175 кг, в том числе орбитальный блок — 2360 кг, и посадочный — 815 кг. В орбитальный блок входит двигательная установка, с помощью которой будет осуществлен переход на ареоцентрическую орбиту. Вес научных приборов, входящих в состав орбитального блока, ~ 57—68 кг. На поверхность Марса предполагается посадить спускаемый аппарат весом ~ 180÷360 кг, в том числе 8,2 кг — приборы для исследования атмосферы на участке спуска и ~ 10 кг — приборы для исследования на поверхности планеты.

Запуск двух космических аппаратов серии «Викинг» намечается на конец семидесятых годов с интервалом в 16 суток. Аппараты достигнут района Марса и выйдут на ареоцентрические орбиты с высотой перицентра не менее 2000 км. Наклонение плоскости орбит аппаратов «Викинг» должно составлять с плоскостью марсианского экватора ~ 20—50°.

Спускаемые блоки совершат посадку на поверхность Марса, по ориентировочным данным, между 30° с. ш. и 20° ю. ш. Фототелевизионное устройство, которое находится в орбитальном блоке, предназначено для уточнения места посадки спускаемого блока, исследования района, где совершит посадку спускаемый блок, а также поиск районов для дальнейших перспективных исследований Марса. В посадочном блоке должна разместиться аппаратура для панорамной съемки поверхности в районе посадки, исследования марсианского грунта, поиска воды, органических соединений, определения состава атмосферы у поверхности, изучения сейсмической активности, ряда биологических исследований. На участке спуска предполагается получение вертикального профиля температуры и давления, определение газового состава марсианской атмосферы на различных высотах. Электропитание приборов посадочного блока на поверхности Марса в течение трех месяцев предполагается осуществить либо за счет солнечных батарей, либо путем использования радиоизотопной энергетической установки с термоэлектрической системой преобразования энергии.

Одним из интересных направлений в исследовании атмосферы Венеры, по-видимому, явится создание дрейфующего зонда-аэростата. Зонд-аэростат изготавливается из пластмассовой пленки диаметром около 5 м. Зонд рассчитывается на дрейф в атмосфере Венеры на высоте ~ 60 км. К зонду-аэростату прикрепляются телевизионная камера и научные приборы, а также сбрасываемые зонды для проведения в самых нижних слоях атмосферы научных измерений. Ретрансляция на Землю осуществляется через основной зонд-аэростат.

Во время полета космического аппарата к Венере сло-

женный зонд-аэростат вместе с научными приборами находится в коническом теплозащищенном кожухе. Кожух сбрасывается в атмосфере Венеры после того, как скорость торможения достигнет величины, при которой аэростат может быть разvernут.

Очень интересным является проект последовательного пролета космического аппарата мимо Венеры и Меркурия с фотографированием поверхности ближайшей к Солнцу планеты.

В 1972—1973 гг. намечаются первые полеты к планетам неземной группы. С этой целью разрабатываются космические аппараты серии «Пионер» для исследования планеты Юпитер с пролетной траекторией. Полет к Юпитеру будет продолжаться около 600 суток. Чтобы избежать повреждения научной аппаратуры излучениями пояса радиации Юпитера, который, по-видимому, окружает планету, пролет космического аппарата намечается осуществить на расстоянии 150 000—500 000 км от Юпитера. С помощью аппаратов «Пионер» предполагается осуществить измерения параметров межпланетной среды, пояса астероидов между орбитами Марса и Юпитера, провести измерения ближайших окрестностей планеты-гиганта (магнитного поля, интенсивности, температуры и направления потока плазмы и ударной волны радиоизлучений), съемки Юпитера в видимых лучах, определение протяженности атмосферы Юпитера над облачным слоем, определение температуры ночной стороны Юпитера и термических аномалий, изучение соотношения водорода и гелия в газовой оболочке Юпитера.

В конце 1970-х годов благодаря благоприятному расположению планет-гигантов возможен запуск космического аппарата, который позволит осуществить последовательно пролет около нескольких внешних планет Солнечной системы.

Основным вариантом является последовательный пролет около Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна — проект «Гранд Тур». Баллистические расчеты показывают, что космический аппарат, стартовавший с Земли, например, 4 сентября 1977 г., достигнет Юпитера 28 января 1979 г., Сатурна — 30 сентября 1980 г., Урана — 1 февраля 1984 г. и Нептуна — 8 ноября 1986 г. Предполагается, что космический аппарат совершает пролет с внутренней стороны колец Сатурна. В этом случае полет продолжится 9,2 года. Если траектория полета проходит с внешней стороны колец Сатурна, полет увеличится до 11 лет с момента запуска.

Программа проекта «Гранд Тур» еще окончательно не принята. Кроме того, возможны различные варианты программы, которые приводятся в табл. 7.

Какие из рассмотренных проектов будут реализованы — сказать трудно, но ясно одно — человечество будет стремить-

Таблица 7

| Пролет около планет  | Благоприятные периоды для запуска аппарата, год |      |      |      |      | Следующий благоприятный период |
|----------------------|---|------|------|------|------|--------------------------------|
|                      | 1976  | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 |                                |
| Юпитер, Сатурн       | X   | X    | X    | —    | —    | 2155 год                       |
| Уран, Сатурн         | —   | X    | X    | X    | —    | 1996 »                         |
| Юпитер, Сатурн       | —   | —    | —    | X    | X    | 1992 »                         |
| Юпитер, Уран         | —   | —    | —    | X    | X    | 1992 »                         |
| Юпитер, Нептун       | —   | X    | X    | —    | —    | 1989 »                         |
| Юпитер, Плутон       | —   | —    | X    | X    | X    | 2155 »                         |
| Юпитер, Уран, Нептун | —   | X    | X    | —    | —    | 2076 »                         |

ся все дальше и дальше проникнуть в глубины Вселенной, ибо, как сказал Р. Тагор, «...кажется, будто Истина появляется с ее последним словом: а последнее слово порождает новое».

Только с вершин нового человечество видит среди «сегодня» свое великое «завтра».

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Сумма технологий и космические исследования . . . . .         | 3  |
| Магнитные поля Луны, Венеры и Марса . . . . .                 | 13 |
| Атмосфера Венеры и Марса . . . . .                            | 17 |
| Ионосфера Венеры и Марса . . . . .                            | 28 |
| Модели атмосфер Венеры и Марса . . . . .                      | 29 |
| Исследование поверхности Луны и механических свойств ее пород | 39 |
| Физические свойства лунных пород . . . . .                    | 48 |
| Типотезы происхождения Луны . . . . .                         | 55 |
| Фотографирование поверхности Марса . . . . .                  | 57 |
| Выстрел во Вселенную — проект «Гранд Тур» . . . . .           | 59 |

*Скуридин Геннадий Александрович*

**Изучение Луны и планет  
космическими аппаратами**

Редактор *Р. Базурин*  
Обложка *М. Дорохова*  
Худ. редактор *В. Конюхов*  
Техн. редактор *А. Красавина*  
Корректор *В. Гуляева*

Д 01774. Сдано в набор 9/III 1971 г. Подписано к печати 21/V 1971 г.  
Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 2. Печ.  
л. 4. Уч.-изд. л. 3,75. Тираж 22 000 экз. Издательство «Знание».  
Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4, Зам. 573. Типография Всесоюзного  
общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.  
Цена 12 коп.

12 коп.



Индекс  
70101