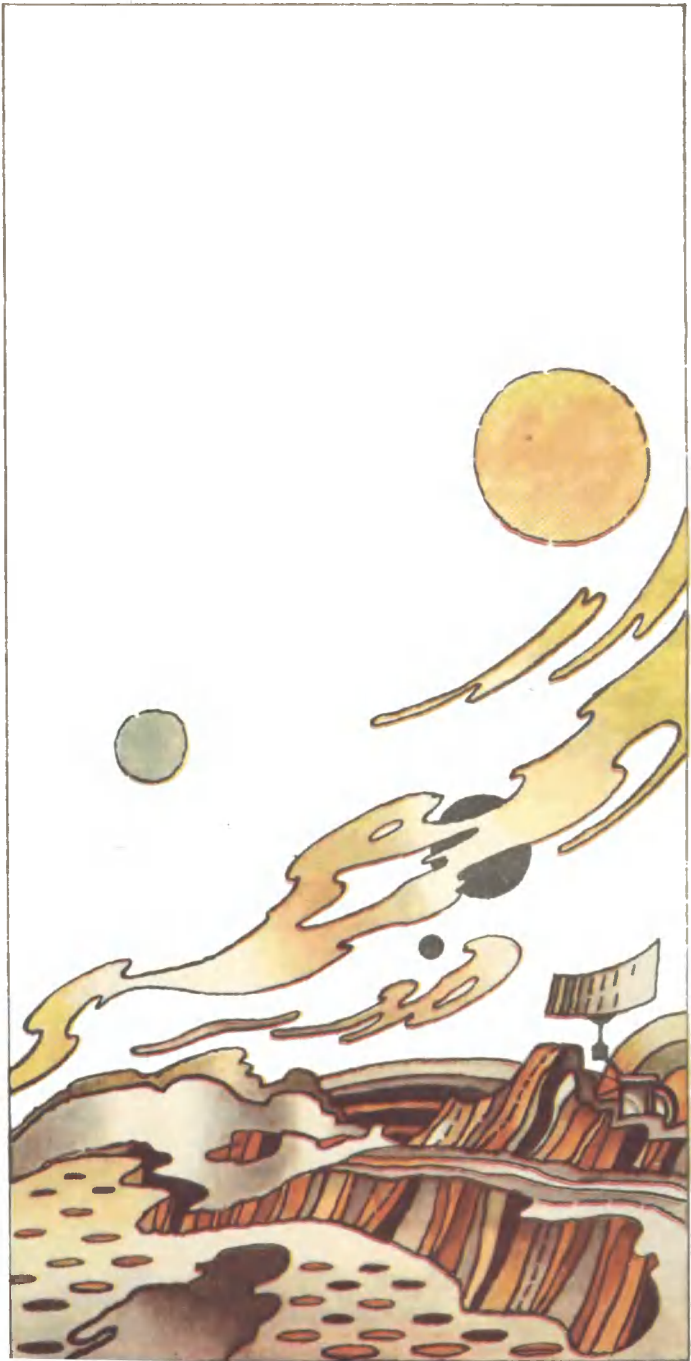


ГЕОЛОГИ ИЗУЧАЮТ ПЛАНЕТЫ





ГЕОЛОГИ ИЗУЧАЮТ ПЛАНЕТЫ



МОСКВА «НЕДРА» 1984

ББК 22.65

Г36

УДК 550:523.3/5

Геологи изучают планеты / Я. Г. Кац, В. В. Козлов, Н. В. Макарова, Е. Д. Сулиди-Кондратьев. М., Недра, 1984, с. 144.

В популярной форме изложены последние данные по геологии Луны, Марса, Венеры; описаны материки и океаны на этих космических телах, процессы оледенения, пыльные бури, гигантские трещины и т. д. Подчеркивается, что знание геологии других планет помогает исследователю разобраться в некоторых сложных проблемах геологического развития Земли, особенно ее ранних стадий.

Для широкого круга читателей, как специалистов, так и неспециалистов, интересующихся вопросами строения и развития планет Солнечной системы.

Г 1904010000—045
043{01}—84 84—83

ББК 22.65
526

Рецензент — д-р геол.-мин. наук Ю. А. Ходак
(Институт литосферы АН СССР)

Предисловие

За последние годы накоплен обширный материал, позволяющий изучать отдельные проблемы геологии планет. Познание геологии планет может иметь определенное значение для выявления некоторых закономерностей строения Земли. В настоящее время ученые пришли к выводу о том, что фундаментальные закономерности в строении и эволюции Земли как планеты могут быть выявлены только в сравнении с другими небесными телами. Так, например, еще академик А. П. Павлов выделил «лунную стадию» в развитии Земли, когда на ней преобладали вулканические процессы; В. Пикеринг объяснил происхождение впадины Тихого океана отрывом Луны от Земли; А. В. Хабаков наметил аналогии в строении лунных и земных вулканических аппаратов и в проявлении на этих небесных телах систем разрывных нарушений.

С началом космической эры, когда был запущен первый искусственный спутник Земли и затем к Луне и к планетам Солнечной системы устремились автоматические межпланетные станции (АМС), а на Луне были проложены первые геологические маршруты, подобные сравнительно-планетологические исследования становились все более многочисленными. На первых порах при неполноте ранних сведений о других планетах возникало естественное стремление объяснить все непонятные феномены привычными в земных условиях геологическими явлениями: кольцевые формы на других планетах пытались сопоставить с земными вулканическими аппаратами; светлые породы на лунных материках сравнивали с гранитами земных континентов. Множество проблем при таком сравнении было решено однозначно. Например, темные породы лунных морей большинство геологов всегда считало базальтовыми лавами. Во всяком случае, различные формы поверхности, выявленные на снимках Луны, Марса, Меркурия, а потом и далеких спутников Юпитера и Сатурна, на радиолокационных снимках Венеры под покровом атмосферы, сразу же получали вполне достоверное геологическое обоснование.

Геологическое изучение других планет дало новый импульс познанию Земли. Успешно расшифровываются все более ранние этапы геологической летописи нашей планеты. Становятся более понятными процессы дифференциации

вещества, приводящие к образованию оболочек Земли — геосфер. Выявляется все больше земных гигантских метеоритных кратеров — аналогов кольцевых образований такого же происхождения на других небесных телах. Изучение далеких планет способствовало формированию новых представлений о путях эволюции Земли, рассмотрению ее строения в глобальном аспекте, во взаимосвязи с развитием Солнечной системы и Галактики в целом.

Задача этой книги — в популярной форме рассказать всем, кто интересуется вопросами строения и развития Земли и других планет с геологических позиций, об общности и различиях их природы.

Сейчас, когда популяризации достижений в изучении космического пространства уделяется большое внимание, многим читателям будет интересно ознакомиться с проблемами геологии планет. Мы надеемся, что эта книга привлечет внимание широкого круга читателей и специалистов-геологов.

Конечно, геология планет во многом еще является наукой будущего, но уже и сейчас накоплен огромный фактический материал, выдвинуты интересные гипотезы, намечены пути решения многих геологических проблем на базе сравнительно-планетологических исследований.

Авторы с признательностью примут замечания и пожелания читателей, направленные по адресу: Москва, В-234, Ленинские горы, МГУ, Геологический факультет, Лаборатория космической геологии.

Пользуясь случаем, авторы выражают искреннюю благодарность своим коллегам по работе: М. Д. Полторак, Г. М. Симоновой и Т. Н. Хохловой за помощь в оформлении книги.



Геология в век изучения космоса

Геология — одна из молодых наук о Земле. Однако геологические наблюдения велись с давних времен, когда человечество стало добывать полезные ископаемые с помощью подземных выработок и проводить глубокие оросительные каналы.

Горные породы первоначально были необходимы в качестве орудий охоты, средств труда и материалов для строительства, позже они стали использоваться как топливо и сырье для выплавки металлов. С горными породами связаны многие области человеческой деятельности; от знания горных пород, от умения их добывать и использовать зависело дальнейшее развитие общества. Потребность в изучении полезных свойств горных пород и выяснение основных закономерностей их размещения на поверхности и в глубинах Земли обусловили быстрый рост геологических знаний.

В настоящее время все области науки, включая геологию, переживают качественный скачок, связанный с научно-технической революцией. Изучение дна Мирового океана, обширные геолого-геофизические исследования на континентах, включая Антарктиду, бурение глубоких и сверхглубоких скважин, моделирование условий земных недр, анализ космических снимков — все это способствовало познанию Земли в планетологическом аспекте. В земных лабораториях уже анализируются образцы лунных пород и дешифрируются с геологических позиций снимки Луны, Марса, Венеры, Меркурия, спутников Юпитера и Сатурна. Появился богатый материал для сравнительного анализа.

Космические методы предоставили геологам богатейшие сведения, позволяющие в глобальном масштабе изучать строе-

ние земной поверхности, решать важнейшие проблемы теоретической геологии и выявлять закономерности размещения полезных ископаемых. Для анализа и обобщения приобретенной космическими путями информации возникла необходимость в создании нового направления в геологической науке — космической геологии. Уже сейчас можно с уверенностью сказать, что ему принадлежит будущее как в изучении строения земной коры, так и в изучении геологии планет Солнечной системы.

Среди многих преимуществ космической съемки важнейшей является возможность широкого охвата местности. Высокая обзорность обеспечивает анализ изображений огромных площадей, полученных при одинаковых условиях съемки. Высокая обзорность достигается за счет большой высоты съемки и использования широкоугольной оптики и сканирующих устройств. Следующим достоинством космической съемки является ее объективность. На одном космическом снимке перед исследователем предстают геологические структуры, развитые на огромной площади, контуры которых не искажены геологом или картографом. Существенное значение имеет периодичность космической съемки, т. е. получение изображений геологических объектов через определенные промежутки времени, что способствует изучению динамики геологических структур. Преимущество космической съемки заключается еще и в возможности изучения геологической структуры, отснятой одновременно с помощью специальной аппаратуры в нескольких зонах спектра.

Космической съемке свойственны оперативность, большая эффективность и значительная экономичность. Она позволяет детально изучать труднодоступные районы земной поверхности. Материалы космических съемок удобны еще и тем, что их с успехом можно обрабатывать с помощью ЭВМ. Преимущества такой съемки очевидны, однако наиболее оптимальные результаты она дает только при комплексном ее использовании с другими традиционными наземными видами геологических работ.

Как же космическая геология способствует поиску минеральных богатств Земли? Изучение космических снимков позволило четко выделить несколько типов геологических структур, которые наземными методами либо не устанавливались, либо устанавливались со значительными трудностями. К ним относятся прямолинейные структуры — линеаменты, прослеженные на многие сотни и даже тысячи километров, и кольцевые образования различных радиусов. Оба типа геоло-

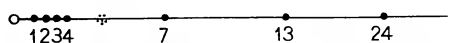
гических структур интересны в теоретическом и практическом отношениях.

Линеаменты — это линейные или пологие дугообразные структуры планетарного значения, связанные в начальном этапе, а иногда на протяжении всей истории развития земной коры с глубинными расколами. Они устанавливаются геологическими, геоморфологическими и геофизическими методами, а теперь в большом количестве обнаруживаются и на космических снимках. При этом установлены две интересные особенности их проявления. Во-первых, степень и количество выявленных структур зависят от масштаба съемки: чем меньше масштаб, тем ярче, отчетливее и протяженнее выглядят линеаменты на космических снимках. Следовательно, особенность космической съемки заключается в генерализации мелких деталей строения в единое целое. Во-вторых, современная геологическая структура, как правило, является секущей по отношению к линеаментам. Это свидетельствует о том, что линеаменты — более древние образования, чем современная геологическая структура. Какова же природа линеаментов, выделяемых по космическим снимкам? Пока на этот вопрос существует несколько ответов: первый отождествляет линеаменты с глубинными разломами земной коры; второй связывает их с зонами повышенной трещиноватости и третий рассматривает линеаменты как поверхностные образования.

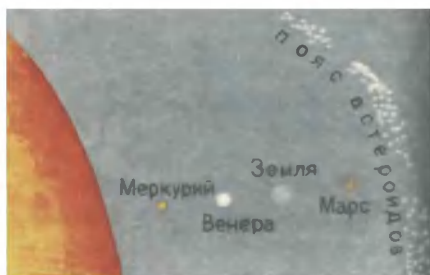
Изучение линеаментов показало, что в большинстве случаев они связаны с расколами в земной коре и отождествляют собой зоны повышенной трещиноватости, где, как известно, происходит концентрация большинства полезных ископаемых. Значит, выявляя с помощью космических снимков новые линеаменты, мы увеличиваем перспективы поисков новых месторождений полезных ископаемых.

Другим важным объектом, который устанавливается с помощью космических снимков, являются кольцевые структуры. Диаметр их разнообразен и колеблется в широком диапазоне. Вопрос о происхождении многих из них до сих пор остается открытым. Пока еще трудно определить, являются ли они следами древней метеоритной бомбардировки, как на Луне, Марсе и других планетах, отражением глубинной структуры Земли или представляют собой кольцевые разломы. Какое из объяснений окажется ближе к истине — покажут дальнейшие исследования.

Очевидно одно — что с помощью космических снимков устанавливается огромное число ранее неизвестных кольцевых структур, которым принадлежит весьма существенная роль



Планеты Солнечной системы



в строении земной коры и с которыми связываются некоторые типы рудных месторождений.

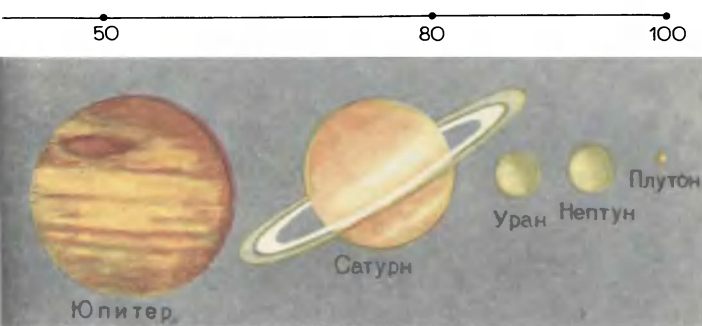
Прогресс в развитии космической техники позволил вплотную подойти к изучению геологии отдельных планет Солнечной системы и выделить новую отрасль естествознания — сравнительную планетологию, т. е. научное направление, которое должно заниматься сравнительным анализом геологического строения планет и Земли.

Что же дает сравнительная планетология для познания геологии нашей планеты? Прежде всего методы сравнительной планетологии позволяют понять процессы формирования первичной коры Земли, ее состава, ранних стадий развития, процессов океанообразования, возникновения рифтогенеза, вулканизма и т. п. Все эти данные помогают выявить новые закономерности размещения месторождений полезных ископаемых в земной коре. Сравнительно-планетологические исследования смыкаются с такими прогрессивными методами как глубинное сейсмическое зондирование и проходка сверхглубоких скважин.

Во-вторых, сравнительно-планетологический метод показал, что в развитии тектонических структур планет земной группы* имеется много сходных черт. Было установлено, что все планеты земной группы имеют ядро, мантию и кору. Кора всех планет может быть подразделена на континентальную, океаническую и переходную. Примечательной особенностью всех планет земной группы является их глобальная асимметрия,

* К планетам земной группы, кроме Земли, относятся Меркурий, Венера, Марс.

расстояние планет от Солнца



выраженная в несимметричном расположении участков коры океанического или континентального происхождения. В коре всех планет и Луны установлены системы разломов. Отчетливо видны трещины растяжения, приведшие к образованию на Земле, Марсе и Венере рифтовых систем. Только на Земле и Меркурии пока установлены структуры сжатия. Только на Земле выделяются складчатые пояса, гигантские сдвиги и шарьяжи. В дальнейшем предстоит выяснить, в чем же причина отличия строения коры Земли: связана она с повышенными ресурсами внутренней энергии или обусловлена другими причинами.

Обнаружение древних вулканов на Марсе и современного вулканизма на спутнике Юпитера Ио показало общность процессов дифференциации вещества, становления литосферы и ее последующих преобразований. Похожими оказались даже формы вулканических аппаратов. С другой стороны, изучение метеоритных кратеров Луны, Марса и Меркурия привлекло внимание к поискам подобных образований на Земле. Сейчас уже выявлены многие десятки достоверно доказанных древних метеоритных кратеров — астроблем, диаметром до сотни километров.

Сравнительно-планетологический метод имеет практические аспекты применительно к геологии. Проникая все глубже в недра в поисках рудных залежей, геологи теснее сталкиваются с проблемами становления начальной коры. Намечается связь рудных месторождений с элементами строения кольцевых структур.



Фотопортреты планет

Одним из ведущих методов изучения планет земной группы и Луны является интерпретация снимков поверхности — своего рода фотопортретов, на которых четко видны все особенности рельефа и структуры, доступные для геологического дешифрирования. В геологических исследованиях аэрофотоснимки давно уже находят самое широкое применение. Одним из инициаторов развития этого направления исследований был академик А. Е. Ферсман. В послевоенные годы в связи с потребностями страны в быстрейшем выявлении минеральных ресурсов были созданы специализированные аэрогеологические экспедиции. Уже в те годы над заснеженными хребтами Алтая и бескрайней тайгой Эвенкии можно было увидеть самолеты с надписью «Аэрогеология» на фюзеляже.

Космические снимки земной поверхности сразу же привлекли внимание геологов. На них удалось увидеть целиком крупные регионы, складчатые пояса, зоны разломов — гигантских трещин в земной коре, своеобразные кольцевые структуры поперечником в десятки и сотни километров. Аэрофотоснимки и космические снимки стали такими же неизменными спутниками геолога, как геологический молоток и горный компас. В зависимости от задач в геологических исследованиях применяются снимки всего масштабного ряда, когда съемка ведется с искусственных спутников Земли, пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций, самолетов на разных высотах. Поэтому иногда говорят об «этажерке» — наборе снимков разной детальности, или разных уровней генерализации.

Снимки глобального уровня были получены с автоматиче-

ских межпланетных станций серии «Зонд» и пилотируемых кораблей «Аполлон», уходящих в сторону Луны. На этих снимках целиком виден весь земной шар. Однако большая часть его поверхности всегда закрыта облачным покровом. Чаще из-под облаков выступают Северная Африка, Средиземноморье, Аравия, районы Ближнего Востока и Средней Азии. На таких снимках четко прослеживаются структуры Альпийско-Гималайского складчатого пояса, выделяются протяженные линеаменты, в которые группируются мелкие разрывы и зоны трещин в земной коре.

Снимки континентального уровня охватывают значительные части континентов. Их получают с автоматических искусственных спутников, предназначенных в первую очередь для метеорологических целей, главным образом для изучения облачного покрова. В СССР это спутники системы «Метеор». Несмотря на свое назначение, эти снимки оказались интересными и для геологов. При малом разрешении — всего 1—2 км на местности — на обширных пространствах при отсутствии облаков на снимках отчетливо дешифрируются крупные черты геологической структуры, в том числе гигантские разломы, складчатые зоны и кольцевые структуры. Эти снимки — ценный материал для тектонического районирования. Благодаря эффекту генерализации, на них как бы выступают глубинные структуры земной коры. Это явление даже было названо «просвечиванием», или «рентгеноскопичностью» мелкомасштабных космических снимков, хотя эти понятия и не соответствуют каким-либо физическим явлениям.

Следующий уровень обычно называют региональным. Разные исследователи предлагают несколько отличные границы по пространственному разрешению для снимков этого уровня генерализации. Наиболее часто в состав таких снимков включают изображения земной поверхности, на которых на местности видны детали размером 50—250 м. Большое число таких снимков получено с пилотируемых космических кораблей и орбитальных научных станций. Например, со станции «Салют-4» съемка выполнялась стационарными камерами КАТЭ-140 и ФМС-80. Она проводилась в ориентированном режиме, т. е. тогда, когда оптические оси аппаратов были направлены строго перпендикулярно к земной поверхности. Камера КАТЭ-140 широкоформатная, с очень высокими оптическими характеристиками. Благодаря высокому качеству негативов возможно получение фотоснимков с многократным увеличением.

Камера ФМС-80 представляет собой блок из четырех



**Вид Земли с высоты 7000 км
(АМС «Зонд-7»)**

фотоаппаратов, работавших одновременно. Благодаря набору пленок и светофильтров каждый аппарат мог получать изображение в определенной зоне спектра. Таким способом весь фотографический диапазон был как бы разрезан на три части. Фотоснимки с минимальными длинами волн (500—600 нм) оказались наиболее интересными для изучения мелководий шельфа, так как на них проступает рельеф дна на небольших глубинах, видны так называемые подводные ландшафты. Снимки средней зоны (600—700 нм) явились основным материалом для расшифровки геологического строения во многих горных районах. В ряде местностей особенно эффективным оказалось использование снимков с длинами волн 700—850 нм, которые захватывают ближний инфракрасный диапазон, невидимый человеческому глазу. На них резко выделяются местности с повышенной увлажненностью, видна вся система даже самых незначительных водотоков. Такие снимки — ценный материал для гидрогеологов, мелиораторов, специалистов в области инженерной геологии. Они оказывают большую помощь при расшифровке глубинного строения равнинных территорий, где особенности строения горных пород на глубине получают отражение в ландшафте. Четвертый аппарат в этой системе был заряжен цветной диапозитивной пленкой с тем, чтобы получать изображение поверхности Земли в цветах, близких к естественным.

Большое место в работе экипажей орбитальных станций уделяется фотосъемке с помощью ручных камер. Такая съемка выполняется через иллюминаторы станции без предварительного ориентирования или в режиме гравитационной стабилизации, когда станция ориентирована своей осью в сторону Земли, сохраняя такое положение длительное время. Снимки при этом получаются преимущественно перспективные. Сами космонавты в соответствии с программой исследований выбирают сюжеты съемки и определяют наиболее благоприятные условия фотографирования. При длительной работе экипажа накапливается ценный материал по условиям космической фотосъемки геологических и других природных объектов. Особенно большая работа по съемке ручными камерами была выполнена космонавтами на станции «Салют-6». В результате съемок Ю. В. Романенко, Г. М. Гречко, В. В. Коваленка, А. С. Иванченкова, В. А. Ляхова, В. В. Рюмина, В. П. Савиных получены тысячи космических фотоснимков, запечатлевших разломы и кольцевые структуры, вулканы, прихотливо изогнутые в сложные складки пласты горных пород в Загросе и Высоком Атласе и следы отступления Каспия. Большое впечатление оставляет снимок газовой пепловой шлейфа во время извержения вулкана Горелый на Камчатке. Снимки представляют особый интерес для целей сравнительно-планетологического анализа. Чтобы убедиться в этом, достаточно положить рядом снимки вулкана Олимп на Марсе и потухшего вулкана Эми-Куси в нагорье Тибести, в центре Сахары. Эти вулканические сооружения оказались удивительно похожими.

Снимками детального уровня являются многозональные фотографии, полученные космонавтами В. Ф. Быковским и В. В. Аксеновым с пилотируемого космического корабля «Союз-22». Они были выполнены с помощью камеры МКФ-6 в процессе эксперимента «Радуга» в результате международного сотрудничества ученых СССР и ГДР в рамках программы «Интеркосмос». Съемка производилась в шести зонах спектра. На снимках, полученных при благоприятных условиях, видны детали размером порядка 15 м на местности. Эти материалы пригодны для обработки с помощью оптико-электронных средств и ЭВМ как в аналоговой, так и в цифровой формах.

Еще более детальные снимки получают с помощью самолетов. При высоте полета более 10 км аэрофотосъемка считается высотной. Ее масштаб варьирует в пределах 1:200 000—1:100 000. С помощью низколетящих самолетов и вертолетов можно получить снимки практически любой необходимой детальности, на которых будут видны даже одиночные деревья

и крупные камни. Наряду с обычными аэрофотоснимками все более широкое применение получают радиолокационные изображения и снимки в инфракрасном тепловом диапазоне, полученные с помощью тепловизоров. Инфракрасная съемка основана на изучении тепловых контрастов и пригодна для распознавания геологических объектов. Особенно эффективно ее использование при изучении районов с активной вулканической деятельностью, при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях, при поисках грунтовых и подземных вод. Радиолокационная съемка может быть осуществлена в любое время суток и при любой погоде, так как облачность, туман и освещенность не влияют на прохождение радиоволн.

В целом геологи сейчас обеспечены большим набором разномасштабных изображений земной поверхности, полученных к тому же в различных зонах спектра. Специалист в области геологического дешифрирования уверенно выделяет на них разломы, кольцевые структуры, трещины, слои горных пород, вулканы и лавовые покровы — все многообразие различных геологических объектов. Накопленный опыт используется для расшифровки снимков других планет, хотя на их фотопортретах выявляется немало загадочного, над чем ученым приходится задумываться.

Как обеспечены снимками другие небесные тела, чем отличаются их фотопортреты от земных? Начнем с Луны, так как благодаря близости к Земле она была давно уже доступна для фотографирования с помощью телескопов. Со времен Галилео Галилея многочисленные исследователи наблюдали, а в дальнейшем и фотографировали видимое с Земли полушарие Луны. Из лучших фотографий, полученных наиболее совершенными инструментами ведущих обсерваторий, собраны фотографические атласы. Для видимого полушария были составлены различные карты, вплоть до масштаба 1:1 000 000, а также фотокарты.

Снимки Луны многократно дешифрировались, в том числе и с геологических позиций. Особое внимание уделялось происхождению многочисленных кратеров, которым приписывалось как метеоритное, так и вулканическое происхождение. Темные покровы в лунных морях большинство исследователей Луны интерпретировали как потоки застывшей базальтовой лавы, хотя высказывались и другие гипотезы. Например, Т. Голд считал их скоплением пыли, а Дж. Вильсон — застывшими битумами. Были введены даже особые названия для предполагаемых лунных пород. Так, светлые породы лунных материков были названы Дж. Сперром луноритом, а



Видимая сторона Луны — Залив Радуги Океана Бурь

Отчетливо видно, как молодые лавовые потоки базальтов перекрывают древние кратерированные материковые поверхности

темные образования морей — лунсбазой. На наиболее совершенных телескопических фотоснимках видны детали размером 800 м на лунной поверхности; при наблюдениях в телескопы, особенно на высокогорных обсерваториях с большой прозрачностью атмосферы, удавалось фиксировать объекты до 500 м в поперечнике.

В результате полетов автоматических и пилотируемых станций получено множество снимков лунной поверхности самой различной детальности, в земные лаборатории доставлены сотни килограммов лунных пород, на поверхности Луны выполнены первые геологические маршруты. Остановимся лишь на главнейших вехах этих выдающихся исследований. Одной из важнейших задач исследований Луны с помощью АМС* было

* Автоматическая межпланетная станция.

получение снимков ее обратной стороны, невидимой с Земли, о строении которой высказывались самые различные гипотезы. В 1959 г. АМС «Луна-3» выполнила фотографирование большей части обратной стороны Луны с площадью около 10 млн. км². Было установлено, что обратная сторона занята в основном материковыми областями светлой окраски с малым числом морских впадин. Исследования в этом направлении были продолжены в 1965 г., который ознаменовался успешным запуском в сторону Луны станции «Зонд-3». В результате с расстояния около 10 тыс. км была сфотографирована 1/3 поверхности обратного полушария Луны. На снимках были видны кратеры разных размеров, протяженные цепочки кратеров, крупные трещины. Не подтвердились гипотезы о развитии сплошного пояса морских впадин и о наличии на обратной стороне предполагаемого Океана Антиподов. В целом обратная сторона естественного спутника Земли перестала оставаться загадкой для человечества.

В 1964 г. поверхности Луны достигла станция «Рейнджер-7». Она совершила посадку в Море Познанном. Станция производила съемку с приближением к поверхности, вплоть до высоты 480 м. На последнем снимке на площади 50×30 м различаются объекты до 0,5 м в поперечнике. Следующие аппараты прилунились в Море Спокойствия и в кратере Альфонс.

На следующем этапе были получены детальные снимки непосредственно на самой поверхности Луны. 3 февраля 1966 г. автоматическая станция «Луна-9» впервые совершила мягкую посадку на восточной окраине Океана Бурь. Станция передала круговые панорамы лунной поверхности. На них видны мельчайшие детали строения грунта, отдельные камни, небольшие кратеры. В этом же году на окололунную орбиту был выведен первый искусственный спутник — автоматическая научная станция «Луна-10». 2 июня 1966 г. мягкую посадку в Океане Бурь вблизи кратера Флеистид совершил космический корабль «Сервейор-1». При съемке на поверхности были использованы светофильтры, что позволило воспроизвести цветные изображения. Поверхность Луны оказалась серо-коричневой.

В октябре 1966 г. на орбиту искусственного спутника Луны была выведена станция «Луна-12». Она выполнила фотографирование отдельных участков Моря Дождей с высоты 100—300 км. На снимках видны детали рельефа поперечником 15—20 м. Были установлены повышенная концентрация мелких кратеров в районе светлых лучей, отходящих от кратера Аристарх. В этом же году в результате мягкой посадки станции «Луна-13» были изучены свойства грунта в районе Океана Бурь. В 1968 г.



Поверхность океанической равнины Утопия на Марсе

станция «Зонд-6» провела фотографирование Луны с расстояний 11 и 2,5 тыс. км, успешно возвратившись на Землю. В последующие два года с помощью станций «Зонд-7» и «Зонд-8» были получены цветные фотографии Луны с различных расстояний.

Большое число самых разнообразных снимков на поверхности Луны было получено американскими астронавтами при выполнении программы «Аполлон», а также с автоматических самоходных аппаратов «Луноход».

Результаты дешифрирования снимков Луны получили обоснование путем сравнения с данными о составе горных пород, образцы которых были доставлены как американскими астронавтами, так и советскими автоматическими станциями серии «Луна».

Марс представляет собой сложный объект для изучения с помощью земных телескопов. Карты этой планеты, основанные на рисунках и фотографиях, выполненных с помощью телескопов, были очень несовершенны. Вполне отчетливо на них изображались полярные шапки, тогда как многие детали строения поверхности выделялись неясно. Основные детали на поверхности Марса получили наименования морей, заливов, озер, болот, равнин, борозд, каньонов. Общеизвестна длительная дискуссия о наличии и происхождении «каналов» Марса.

Несмотря на несовершенство карт Марса, составленных на основе телескопических наблюдений, неоднократно предпринимались попытки их истолкования с геологических позиций.

Новый этап исследований Марса с помощью космических аппаратов начался в ноябре 1962 г., когда АМС «Марс-1» стартовала в сторону этой планеты. Первые снимки Марса были переданы АМС «Маринер-4» в 1965 г. На них удалось отдешифровать, в частности, большое число кратеров поперечником 5—20 км. В 1969 г. с автоматических станций получено значительное число снимков поверхности этой планеты с разрешением до 0,5 км.

В 1971 г. окрестностей Марса достигли АМС «Марс-2», «Марс-3» и «Маринер-9». Спускаемый аппарат станции «Марс-3» совершил посадку на поверхность планеты. Одна из перечисленных станций стала искусственным спутником Марса, передав большое число снимков поверхности разной детальности. Эти снимки явились основой для составления топографической карты всей поверхности планеты. Они позволили обнаружить большое число кратеров, трещин, вулканических аппаратов, выявить основные черты рельефа, предоставив исследователям богатый материал для анализа геологии планет.

В 1974 г. окрестностей Марса достигли АМС «Марс-4», «Марс-5», «Марс-6» и «Марс-7». С их помощью были получены снимки поверхности с высоким разрешением. Станция «Марс-5» стала искусственным спутником планеты, а спускаемый аппарат станции «Марс-6» совершил мягкую посадку на ее поверхность. В 1976 г. к Марсу подошли станции «Викинг-1» и «Викинг-2». Их посадочные блоки опустились в двух различных районах. На панорамах поверхности, переданных этими станциями, представлены участки песчаных пустынь со множеством угловатых камней. Был определен состав пород, который дает основание предполагать распространение полевых шпатов, пироксенов, оливина и ильменита. Красноватый оттенок поверхности объясняется развитием соединений железа: гетита и лимонита.

Очень интересными оказались также снимки спутников Марса — Фобоса и Деймоса. Привлекавшая внимание писателей-фантастов гипотеза об искусственном происхождении этих спутников не подтвердилась. Зато было надежно установлено, что Фобос и Деймос — глыбы поперечником около 20 км неправильной, угловатой формы, густо усеянные кратерами. Снимки спутников Марса были получены при последующем их изучении. Гребни на поверхности рассматриваются как следы соударений и скалывания при столкновениях с телами астероидных размеров. Кратеры на этих спутниках могли образоваться только за счет ударов метеоритов, так как по-



Поверхность Меркурия

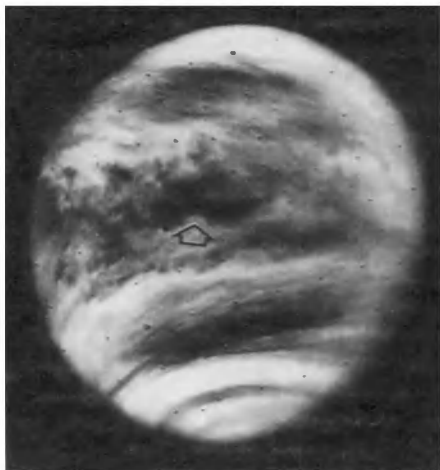
Отчетливо видны метеоритные кратеры различных генераций и размеров

добные глыбы не могут обладать внутренней активностью и соответственно вулканизмом. Установление кратеров (диаметром до 6 км) на поверхности спутников Марса — один из важных доводов в пользу метеоритного происхождения кратеров на планетах и их спутниках.

До последнего времени Меркурий оставался самой загадочной планетой земной группы. Из-за сложности наблюдений с помощью земных телескопов карты и зарисовки Меркурия были крайне схематичны и плохо согласовывались между собой. На этих рисунках обычно выделялись лишь темные пятна и линии неправильной формы.

С началом космической эры появилась возможность изучить Меркурий по космическим снимкам. Космическая станция «Маринер-10» трижды облетела Меркурий (29 марта и 21 сентября 1974 г. и 16 марта 1975). При этом минимальное расстояние до поверхности планеты составило 210 км. Станция передала многочисленные телевизионные снимки, на которых заснято около 30% площади поверхности. Снимки позволили получить представление о рельефе и структуре поверхности, провести анализ методами геологического дешифрирования.

Если положить рядом снимки Луны и Меркурия, то иногда их не сможет сразу различать даже специалист: настолько



Фотопортрет Венеры

Видны облака, имеющие
вихревую структуру

близкими оказались их фотопортреты. Большая часть поверхности представляет собой континентальную область, насыщенную кратерами разных размеров.

Анализ полученных снимков позволил высказать ряд гипотез о составе пород, слагающих поверхность Меркурия. Равнины Меркурия отличаются лишь несколько более светлой и красноватой окраской по сравнению с окружающими горами.

Материал, слагающий морские равнины, предположительно вулканического происхождения. Вулканический характер подтверждается особенностями строения поверхности, зафиксированными на снимках. Местами на них прослеживаются уступы извилистой формы, напоминающие фронтальные уступы лавовых покровов в лунных морях. В отличие от Луны и Земли, где высота подобных уступов составляет всего десятки метров, на равнинах Меркурия их высота местами достигает 200—500 м. Причина различий должна заключаться в более вязком составе лав Меркурия. Такое допущение несовместимо с низкой отражательной способностью и высокой плотностью пород Меркурия, присущими ультраосновным породам. Поэтому было высказано предположение о том, что морские впадины Меркурия заполнены своеобразными слабодифференцированными ультраосновными лавами, близкими по составу к мантийному веществу планеты.

Венера всегда привлекала особое внимание исследователей. Ведь по размерам она близка к Земле, а значит, эти планеты-близнецы должны быть во многом похожими. Однако

Крупнейший спутник Юпитера — Ганимед

Хорошо видны крупные
темные впадины,
напоминающие лунные
моря, и светлые пятна,
которые считаются
кратерами



на Венере установлены существенные различия, которые описаны в специальном разделе.

С помощью нескольких различных космических аппаратов в 1979 г. получены снимки спутников Юпитера. Самый крупный из спутников — Ганимед. Его диаметр достигает 5 280 км. Низкая средняя плотность указывает на примерно равные соотношения льда и силикатных пород в его составе. Цвет поверхности коричневато-серый. Она отражает 43% света. На снимках Ганимеда выделяется округлая темная область поперечником около 3200 км с большим количеством кратеров. Видны также светлые пятна диаметром порядка 300 км. Предполагается, что это древние кратеры, в значительной степени утратившие морфологическую выраженность из-за пластичности ледяного субстрата. Видны также изогнутые гряды с широкими понижениями между ними — обрамление крупной впадины типа кругового моря. Многие кратеры окружены лучевыми системами. Светлые лучи прослеживаются на 300—500 км. Скорее всего это выбросы льда. Местами выделяются венчики более коротких лучей темного цвета. Вероятно, это выбросы силикатных пород базальтового состава.

Второй по величине спутник Юпитера — Каллисто. Его диаметр 4840 км, почти равен поперечнику Меркурия. Низкая средняя плотность свидетельствует о большой роли льда в его составе, однако поверхность имеет коричневатый цвет и низкую

отражательную способность. Здесь можно говорить о развитии своего рода «поверхностной морены» — покрова каких-то горных пород. Поверхность Каллисто сплошь покрыта кратерами. По насыщенности кратерами он может быть сопоставлен только со спутником Сатурна Тефией. Преобладают кратеры поперечником в десятки километров. Выделяются лишь две круговых впадины поперечником в 3000 и 1500 км. При близости размеров и средних плотностей, а следовательно и состава, Каллисто резко отличается от Ганимеда по степени тектонической активности, что связано с разной удаленностью от планеты, определяющей величину приливного воздействия.

Особенно интересными оказались снимки Ио. Этот спутник имеет диаметр 3640 км, т. е. превышает размеры Луны. Поверхность Ио ярко окрашена, очень светлая и отражает 63% солнечных лучей. По мнению К. Сагана, яркую красно-оранжевую окраску поверхности Ио придают соединения серы. При этом черные пятна на поверхности могут быть озерами жидкой горячей серы. На поверхности Ио видны горы высотой 4—8 км. Однако феноменом являются действующие вулканы Ио, о которых будет подробно рассказано в одной из глав.

Следующий по размеру спутник Европа диаметром 3130 км. Его поверхность светло-оранжевая, она отражает 64% солнечных лучей. На снимках Европы видны детали размером порядка 5 км. На его поверхности обнаружено всего три ударных кратера, что свидетельствует о молодости рельефа. Гладкая поверхность рассечена многочисленными полосами и узкими грядами, образующими сложное переплетение.

Небольшой спутник Амальтея вытянутой формы (260×140 км) имеет очень темную красноватую поверхность, с кратерами диаметром около 10 км. У Юпитера обнаружены также небольшие по размерам спутники поперечником 25—40 км. Так же как и Амальтея, они могут быть астероидами, захваченными гравитационным полем Юпитера.

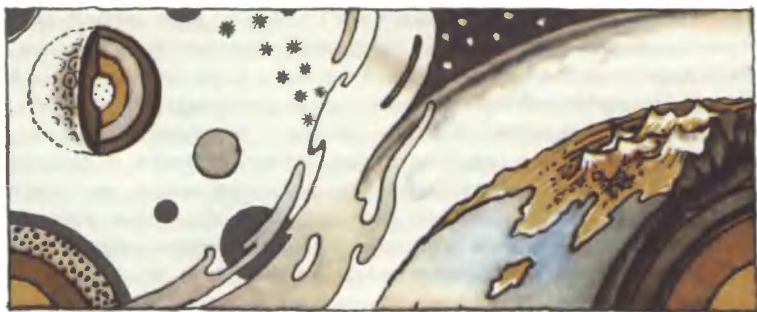
В последние годы получены интересные данные о строении спутников Сатурна с помощью межпланетных космических аппаратов. Среди спутников этой планеты выделяется Титан. Он гораздо больше Луны и Меркурия. Его диаметр составляет 5120 км. Данные о средней плотности указывают на то, что он состоит из смеси льда и горных пород примерно в равных соотношениях. Поверхность Титана скрыта густыми облаками оранжевого цвета. В составе атмосферы преобладает азот, установлена существенная примесь метана.

Следующая по размерам группа спутников, включающая Рею, Диону и Тефию, отличается существенно меньшими раз-

мерами. Диаметр Реи составляет 1 530 км. При небольшой отражательной способности и средней плотности $1,3 \text{ г/см}^3$ допускается, что она образована из льда с примесью горных пород. Поверхность Реи сплошь усыпана кратерами, поперечник которых достигает 300 км. Диона — меньшего размера, диаметром 1120 км, но несколько более плотная и серого цвета. На поверхности выделяется большое число кратеров диаметром до 100 км. Наблюдаются также обширные участки темного цвета, похожие на лунные моря. Поперечник Тефии составляет 1050 км. Ее поверхность также густо усыпана кратерами. По их плотности этот спутник пока лидирует в Солнечной системе. По данным отражательной способности и средней плотности, Тефия должна представлять собой гигантскую глыбу льда.

Более мелкие спутники Сатурна также состоят в основном из льда. Это Энцелад диаметром около 500 км. При небольшой плотности он практически полностью отражает весь падающий на него солнечный свет. Мимас в поперечнике составляет 390 км. Поверхность его почти сплошь покрыта кратерами. Один из них резко выделяется своим размером в 130 км. Другие спутники еще более мелкие. Малые спутники имеют округло-овальную форму и очень светлую поверхность.

Таким образом, сейчас получен уникальный материал, позволяющий изучать строение поверхности твердых планет и спутников теми же методами, которые применяются геологами в земных условиях. Истина познается в сравнении: сравнивая фотопортреты далеких планетных тел, ученые отмечают черты сходства и различия, находят объяснение многим загадочным феноменам.



Что в глубинах планет?

Изучение глубинного строения Земли и планет земной группы — проблема сложная. Какими же путями она решается? Один из путей состоит в изучении скорости распространения сейсмических волн в глубоких недрах. Известно, что скорость продольных сейсмических волн возрастает в более плотных средах. Сейсмические колебания могут быть вызваны источниками двух видов: естественными и искусственными. Естественными источниками колебаний являются землетрясения, волны которых несут необходимую информацию о плотности пород, сквозь которые они проникают. Арсенал искусственных источников колебаний более обширен. В первую очередь искусственные колебания вызываются взрывом. Проведением взрывных работ и изучением скоростей сейсмических волн занимается сейсморазведка — одна из важнейших отраслей современной геофизики. В последнее время геофизики все чаще стараются обходиться без взрывов, вызывая колебания с помощью специальных вибраторов.

Итак, мы видим, что на Земле проблема возбудителей сейсмических колебаний решается достаточно просто. Как эта же проблема разрешается на Луне и других небесных телах? При изучении глубинного строения планет на первое место выдвигается вопрос о возбудителях колебаний. Естественные сейсмические колебания зарегистрированы в настоящее время сейсмографами, установленными на Луне. Однако проблема глубинного изучения решается более определенно с помощью искусственных источников колебаний. На Луне, например, в качестве возбудителей сейсмических волн были использованы отработанные системы космических носителей.

Американские исследователи для этой цели применяли лунный модуль или третью ступень ракеты носителя «Сатурн-5», падение которых строго регулировалось. Лунный модуль сбрасывался обычно на поверхность Луны с высоты около 100 км в определенном пункте с учетом положения заранее установленного сейсмографа. Изучение лунных сейсмограмм показало, что это небесное тело так же, как и Земля, состоит из нескольких оболочек.

Что же дало изучение сейсмических волн Земли? Анализ их распространения выявил несколько скачков изменения скорости при прохождении через недра планеты. Один скачок, при котором скорости возрастают с 6,7 до 8,1 км/с, как считают геологи, регистрирует подошву земной коры. Эта поверхность располагается на различных уровнях, от 5 до 75 км. Граница земной коры и нижележащей оболочки — мантии, получила название «поверхности Мохоровичича», по имени впервые установившего ее югославского ученого А. Мохоровичича.

Мантия залегает на глубинах до 2 900 км и делится на две части: верхнюю и нижнюю. Граница между верхней и нижней мантией также фиксируется по скачку скорости распространения продольных сейсмических волн (11,5 км/с) и располагается на глубинах от 400 до 900 км. Верхняя мантия имеет сложное строение. В ее верхней части имеется слой расположенный на глубинах 100—200 км, где происходит затухание поперечных сейсмических волн на 0,2—0,3 км/с, а скорости продольных волн, по существу, не меняются. Этот слой назван волноводом. Его толщина обычно равняется 200—300 км. Часть верхней мантии и кора, залегающие над волноводом, называются литосферой, а сам слой пониженных скоростей — астеносферой.

Таким образом, литосфера представляет собой жесткую твердую оболочку, подстилаемую пластичной астеносферой. Предполагается, что в астеносфере возникают процессы, вызывающие движение литосферы.

Здесь уместно остановиться на интереснейшем опыте, поставленном под руководством академика А. П. Виноградова. Смесь из образцов различных горных пород и каменных метеоритов медленно пропускалась через раскаленное металлическое кольцо. Во время опыта вещество разделилось по плотности: легкие и подвижные компоненты поднялись вверх, тяжелые и тугоплавкие — опустились вниз. Процесс этот получил название зонной плавки. В строении верхних оболочек Земли установлена та же зависимость, обусловлен-

ная тем же процессом зонной плавки. Зонная плавка в земных условиях протекает в астеносфере.

В подошве мантии происходит резкое уменьшение скорости распространения продольных волн с 13,9 до 7,6 км/с. На этом уровне лежит граница между мантией и ядром Земли, глубже которой поперечные сейсмические волны уже не распространяются. Радиус ядра достигает 3 500 км; объем 16% объема планеты, а масса 31% массы Земли. Многие ученые считают, что ядро находится в расплавленном состоянии. Его внешняя часть характеризуется резко пониженными значениями скоростей продольных волн, во внутренней части (радиусом в 1200 км) скорости сейсмических волн вновь возрастают до 11 км/с. Плотность пород ядра равна 11 г/см³, и она обуславливается наличием тяжелых элементов. Таким тяжелым элементом может быть железо. Вероятнее всего, железо является составной частью ядра, так как ядро чисто железного или железо-никелевого состава должно иметь плотность, на 8—15% превышающую существующую плотность ядра. Поэтому к железу в ядре, по-видимому, присоединены кислород, сера, углерод и водород.

У Земли существуют также и внешние оболочки: гидросфера и атмосфера. По определению академика В. И. Вернадского, земные оболочки — это концентрические слои, меняющиеся с глубиной в вертикальном разрезе планеты и отличающиеся друг от друга характерными для каждой, только ей свойственными особыми физическими, химическими и биологическими качествами.

Имеется еще один путь изучения глубинного строения планет — геохимический. Выделение различных оболочек Земли и других планет земной группы по физическим параметрам находит достаточно четкое геохимическое подтверждение, основанное на теории гетерогенной аккреции, согласно которой состав ядер планет и их внешних оболочек в основной своей части является исходно различным и зависит от самого раннего этапа их развития. Ведущий советский геохимик В. Л. Барсуков считает, что в результате этого процесса в ядре концентрировались наиболее тяжелые (железо-никелевые) компоненты, а во внешних оболочках — более легкие силикатные (хондритовые), обогащенные в верхней мантии летучими веществами и водой.

Важнейшей особенностью планет земной группы является то, что их внешняя оболочка, так называемая кора, состоит из двух типов вещества: «материкового» — полевошпатового и «океанического» — базальтового.

Материковая (континентальная) кора Земли сложена гранитами или породами, близкими им по составу, т. е. породами с большим количеством полевых шпатов. Образование «гранитного» слоя Земли обусловлено преобразованием более древних осадков в процессе гранитизации. Гранитный слой, по мнению В. Л. Барсукова, надо рассматривать как специфическую оболочку коры Земли — единственной планеты, на которой получили широкое развитие процессы дифференциации вещества с участием воды и имеющей гидросферу, кислородную атмосферу и биосферу. На Луне и, вероятно, на планетах земной группы континентальная кора складывается габбро-анортозитами — породами, состоящими из большого количества полевого шпата, правда, несколько другого состава, чем в гранитах. Этими породами сложены древнейшие (4,0—4,5 млрд. лет) поверхности планет.

Океаническая (базальтовая) кора Земли образована в результате растяжения и связана с зонами глубинных разломов, обусловивших проникновение к базальтовым очагам верхней мантии. Базальтовый вулканизм накладывается на ранее сформировавшуюся континентальную кору и является относительно более молодым геологическим образованием.

В. Л. Барсуков считает, что условия проявления базальтового вулканизма на всех планетах земного типа, по-видимому, аналогичны. Широкое развитие базальтовых «морей» на Луне, Марсе, Меркурии, очевидно, связано с растяжением и образованием вследствие этого процесса зон проницаемости, по которым базальтовые расплавы мантии устремлялись к поверхности. Этот механизм проявления базальтового вулканизма является более или менее сходным для всех планет земной группы.

Спутница Земли — Луна также имеет оболочечное строение. Изучение ее глубин с помощью лунотрясений и при измерении физических полей показало, что она в целом однороднее Земли. По мнению советского геофизика И. Н. Галкиной, глобальной особенностью глубинной структуры Луны является ее разделение примерно пополам на жесткую холодную внешнюю сферу и разогретую пластичную внутреннюю область, залегающую на глубинах 800—1 000 км. Между внешней и внутренней оболочками выделяется переходная зона. Внешняя оболочка по аналогии с Землей названа литосферой. Литосфера Луны очень жестка и до такой степени добротна, что вызванные в ней сейсмические сигналы фиксируются длительное время. Скачок в скорости прохождения сейсмических волн устанавливается на разделе коры

Луны и ее мантии и объясняется изменением состава горных пород. Мощность коры варьирует в широких пределах от 150 км на ее обратной стороне до 40 км на полюсах. В Море Дождей расчетная мощность 60 км.

В отличие от Земли, где скорость сейсмических волн в целом растет с глубиной, на Луне рост скоростей отмечается лишь в пределах коры. В мантии Луны скорость сейсмических волн не увеличивается. В переходной зоне, расположенной глубже 500—600 км, резко изменяются физические свойства пород и уменьшается энергия сейсмических волн. Здесь размещаются очаги приливных лунотрясений. Внутренняя сфера Луны характеризуется резким ослаблением амплитуды поперечных сейсмических волн. Тем, что поперечные волны в ней не проходят, она напоминает ядро Земли и находится, вероятно, в жидком состоянии. Однако на Луне она названа астеносферой, потому что давление здесь такое же, как в астеносфере Земли на глубинах 100—150 км. Астеносфера Земли по толщине составляет $1/30$ — $1/60$ ее радиуса, а астеносфера Луны, по данным И. Н. Галкина, в 10 раз мощнее и составляет половину лунного радиуса. В центре Луны располагается железо-сульфидное расплавленное ядро радиусом 200—400 км.

Еще один путь изучения глубинного строения Земли — это изучение ее теплового потока. Известно, что Земля, горячая изнутри, отдает свое тепло. О нагреве глубоких горизонтов свидетельствуют извержения вулканов, гейзеры, горячие источники. Тепло — главный энергетический источник Земли. Прирост температуры с углублением от поверхности Земли в среднем составляет около 15°C на 1 км. Это значит, что на границе литосферы и астеносферы, расположенной примерно на глубине 100 км, температура должна быть близкой к 1500°C . Установлено, что при такой температуре происходит плавление базальтов. Это означает, что астеносферная оболочка может служить источником магмы базальтового состава. С глубиной изменение температуры происходит по более сложному закону и находится в зависимости от изменения давления. Согласно расчетным данным, на глубине 400 км температура не превышает 1600°C и на границе ядра и мантии оценивается в 2500 — 5000°C .

Установлено, что выделение тепла происходит постоянно по всей поверхности планеты. Тепло — важнейший физический параметр. От степени нагрева горных пород зависят некоторые их свойства: вязкость, электропроводность, магнитность, фазовое состояние. Поэтому по термическому со-

стоянию можно судить о глубинном строении Земли. Изменение температуры нашей планеты на большой глубине — задача технически сложная, так как измерениям доступны лишь первые километры земной коры. Однако внутренняя температура Земли может быть изучена косвенным путем при измерениях теплового потока.

Остывает ли наша планета за счет теплового потока? Подсчитано, что средний тепловой поток с квадратного метра равен 0,06 Вт, что составляет около 30 триллионов ватт для Земли в целом. Солнце посылает на Землю тепловой энергии в 4 тыс. раз больше. Таким образом, основным источником тепла на Земле является Солнце, но при этом интересно отметить, что суммарная мощность теплового потока превышает в 30 раз мощность всех электростанций Земли.

Измерения показали, что средний тепловой поток на континентах и в океанах одинаков. Этот результат объясняется тем, что в океанах большая часть тепла (до 90%) поступает из мантии, где интенсивнее происходит процесс переноса вещества движущимися потоками — конвекцией. Конвекция — процесс, при котором разогретая жидкость расширяется, становясь легче, и поднимается, а более холодные слои опускаются. Поскольку мантийное вещество ближе по своему состоянию к твердому телу, конвекция в нем протекает в особых условиях, при невысоких скоростях течения материала. Какова же тепловая история нашей планеты? Ее первоначальный разогрев, вероятно, связан с теплом, образованным при соударении частиц и их уплотнении в собственном поле силы тяжести. Затем тепло явилось результатом радиоактивного распада. Под воздействием тепла возникла слоистая структура Земли и планет земной группы. Радиоактивное тепло в Земле выделяется и сейчас. Существует гипотеза, согласно которой на границе расплавленного ядра Земли продолжают и поныне процессы расщепления вещества с выделением огромного количества тепловой энергии, разогревающей мантию.

Итак, изучение теплового потока Земли свидетельствует о конвективном перемещении вещества, связанном с тепловым потоком Земли, и о наличии ядра, мантии и коры, т. е. свидетельствует о ее слоистом строении.

При рассмотрении вопроса о тепловом балансе Земли небезынтересно остановиться на гипотезе советского ученого С. М. Григорьева. По представлениям этого автора, в глубинах Земли обязательно должна существовать зона пород, в которой господствует температура $374,15^{\circ}\text{C}$. Эта

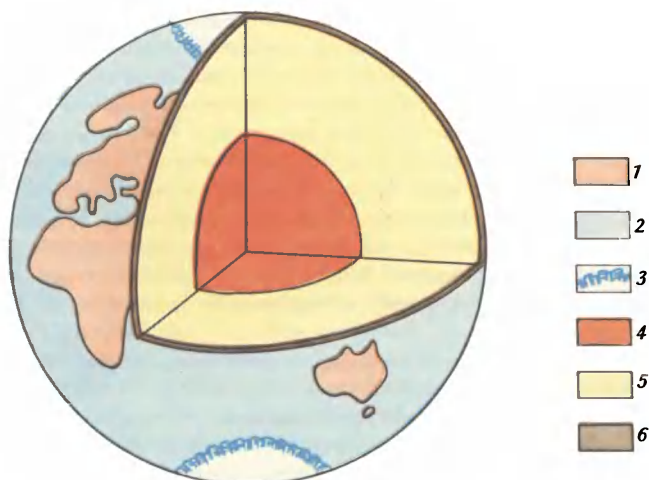
температура — критическая для воды. При ней, каково бы ни было давление, образуется пар. Но вода способна растворить многие минеральные вещества, превращаясь в растворы. Критическая температура у минеральных растворов выше, чем у чистой воды, и достигает 450°C . Под действием гидростатического давления она стремится стечь вниз, просачиваясь через проницаемые породы земной коры и растворяя в них на своем пути различные минеральные вещества.

При температурах выше 400°C с минеральными растворами и породами происходят постепенные изменения: вода в виде пара уходит вверх, захватывая с собой летучую кремнекислоту, а железо, кальций, магний, титан и ряд других элементов оседают, уплотняя залегающие породы. Пар снова превращается в воду, а кремнезем выпадает в осадок. Затем все повторяется сначала. Так выглядит механизм действия «дренажной оболочки». Важно отметить, что такой процесс восходящей и нисходящей циркуляции возник на самых ранних стадиях появления и формирования нашей планеты и, видимо, будет происходить бесконечно длительное время.

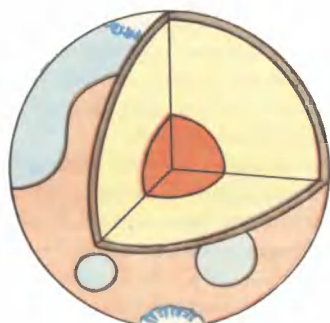
Таким образом, С. Григорьев отождествляет нашу Землю с огромным паровым котлом, тепловая энергия которого в 10 тыс. раз превосходит количество тепла, заключенного в геологических запасах различного топлива. Перед наукой и техникой поставлена серьезная задача — научиться извлекать из «дренажной оболочки» Земли тепло для нужд человечества в ближайшие годы.

Состав различных оболочек Земли теоретически может быть определен, если известны их плотность, температура и давление. Используя зависимость между перечисленными параметрами, ученые теоретически рассчитали, какими породами может быть сложена та или иная оболочка Земли. По минеральному составу Земля, таким образом, делится на три части: нижнюю, представляющую собой железное ядро, среднюю — оболочку, отвечающую мантии и сложенную силикатами ультраосновного состава, и верхнюю оболочку — литосферу, характеризующуюся разнообразным составом пород.

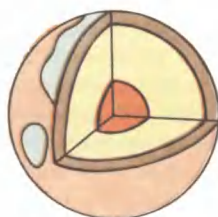
Таково современное состояние твердой Земли. Однако известно, что наша планета, как и другие планеты Солнечной системы, образовалась около 4 млрд. лет назад путем аккреции вещества газово-пылевого протопланетного облака. Первичное скопление материала, вероятно, происходило при температурах, не превышающих 100°C , при которых могло идти образование некоторых магнезиальных силикатов, металлического железа и некоторых сульфидов желе-



Земля



Марс



Луна

Внутреннее строение Земли, Марса и Луны

1 — континентальные области; 2 — океанические области; 3 — полярные зоны; 4 — ядро; 5 — мантия; 6 — кора

за. Основной путь образования планет заключался в дифференциации материала с образованием оболочек и ядра. Высокие температуры, известные в недрах Земли, могут быть объяснены распадом короткоживущих радиоактивных элементов и, возможно, тяжелой метеоритной бомбардировкой, характерной для всех планет земной группы. Установлено, что расслоение Земли на ядро и оболочки стало возмож-

ным после того, как температура ее отдельных частей достигла 1500°C , т. е. поднялась до точки плавления железа. Расплавленное тяжелое железо, скапливаясь по законам гравитации, образовало ядро, вокруг которого происходила концентрация пород мантии и литосферы. Естественно, что процесс образования планет из газово-пылевого облака был длительным. Длительность этого процесса зависит от массы и размеров планет. Поэтому становится понятным, что Земля, имеющая больший радиус, чем, скажем, Луна, Марс, Венера и Меркурий, обладает большими энергетическими ресурсами и продолжает свое геологическое развитие до настоящего времени.

Луна, Марс, Венера и Меркурий свои энергетические ресурсы утратили и поэтому представляют собой геологически пассивные объекты. Этим выводом можно объяснить и то положение, что Земля и Луна, сформированные примерно на одном удалении от Солнца, согласно законам распределения вещества с одинаковыми магнитными свойствами — магнитной сепарации, должны иметь равные исходные концентрации элементов, в том числе и радиоактивных. Луна, в отличие от Земли, находясь в состоянии тектонического покоя, может расходовать радиоактивное тепло только на подогрев своего тела, в то время как на Земле оно является также и источником тектонических преобразований.

При построении модели Марса следует исходить из теоретических расчетов о конденсации протопланетного облака в зоне этой планеты в условиях, при которых часть железа замещалась серой, а магнезиальные силикаты обогащались железом в большем количестве, чем при образовании Земли и Венеры. Это обстоятельство может свидетельствовать о том, что ядро Марса складывается преимущественно сернистым железом; заметное количество железа присутствует и в его силикатных оболочках. По разработанной модели Марса его кора имеет толщину до 100 км, значительно обогащенную железом мантию — толщиной около 2500 км и небольшое ядро. Ядро Марса, по данным В. Н. Жаркова, составляет 7% полной массы планеты. Анализ гравитационного поля Марса и интерпретация полученной сейсмограммы позволили отметить распределение утонений и утолщений коры в зависимости от форм рельефа: более толстая кора соответствует возвышенностям, а более тонкая — понижениям. В среднем толщина коры под континентами Марса составляет 43—45 км, местами увеличиваясь до 80—100 км, а в пониженных участках — не превышает 10—30 км.

Меркурий имеет, вероятно, расплавленное железное ядро и силикатную оболочку. Температура на границе ядра и силикатной оболочки оценивается 2000°C .

Итак, планеты земной группы характеризуются слоистым строением. У них выделяются ядро, мантия и кора, размеры и соотношения которых индивидуальны для каждой планеты. Естественно, что наиболее изучены недра Земли, хотя и здесь имеется еще очень много нерешенных проблем. Современные технические средства позволили раскрыть некоторые тайны Луны и Марса и создать оптимальные модели их строения. К изучению Меркурия и Венеры ученые только приступили. Однако сведения, полученные при исследовании планет земной группы, достаточно однозначно свидетельствуют об образовании планет из газово-пылевого облака путем дальнейшей дифференциации материала с образованием ядра и оболочек.



Пустынные континенты и безводные океаны

На любой географической карте Мира видно, что земной шар четко разделяется на континенты, возвышающиеся в виде гигантских островов, и океанические впадины. Геологические исследования давно уже показали, что в строении континентов и океанических впадин имеются принципиальные различия.

Кора континентов (средняя мощность 35 км, максимальная под горами 70—75 км) имеет слоистое строение. Под чехлом осадочных пород залегает гранитный слой коры. Во многих местах, в пределах древних щитов и выступов, он вскрывается непосредственно на земной поверхности. На территории СССР это Карелия и Кольский полуостров, Украина, районы Анабара, Енисейского кряжа и Патомского нагорья. В составе этого слоя преобладают магматические породы, в том числе граниты, гнейсы, кристаллические сланцы, железистые кварциты, мраморы.

Океаническая кора мощностью всего 5—10 км состоит преимущественно из базальтов, на которых непосредственно залегают осадочные породы океанического ложа. На границах океанических впадин и континентов выделяются области с корой переходного типа: от континентов к океанам мощность коры сокращается и постепенно исчезает гранитный слой.

Различия в составе и соответственно в плотностях кор разного типа привели к тому, что сравнительно «легкие» континенты возвышаются над уровнем океана, тогда как области с «тяжелой» корой океанического типа представляют собой впадины, заполненные водой.

Попытаемся представить, что же делается на других небесных телах, каковы «инопланетные» аналоги земных континентов и океанических впадин. Конечно, аналогия является неполной, так как обширные впадины безводны, а континенты больше всего напоминают пустынные области Земли.

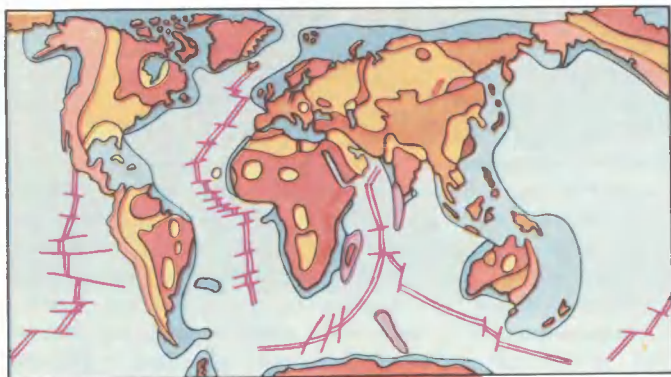
Многие исследователи дали весьма подробные, красочные и увлекательные описания лунной поверхности. Поэтому здесь отмечены лишь основные особенности рельефа Луны, необходимые для понимания ее «геологического» строения. При наблюдениях Луны в телескоп и при просмотре лунных фотографий сразу же бросается в глаза своеобразие рельефа, выразившееся в широком распространении возвышенностей со светлой окраской, контрастирующих с равнинными пространствами более темного тона. Первые наблюдатели Луны считали, что темные равнины являются настоящими морями, заполненными водой. И хотя давно уже доказано, что воды в них никогда не было, этот термин, предложенный Риччиоли, прочно вошел в селенологическую литературу. Заметим, кстати, что с геологической точки зрения этот термин вполне оправдан, так как предполагается общность происхождения лунных морей и океанических впадин Земли.

В настоящее время рельеф Луны сравнительно хорошо изучен. Максимальные амплитуды рельефа на Луне не превышают 12—13 км. Наиболее высокие вершины расположены в районе гор Лейбница вблизи южного полюса Луны. Их превышения составляют более 8 км.

Значительные площади относительно светлой окраски, с неровной поверхностью и с многочисленными кольцевыми горами получили название континентов, или материков. В их пределах выделяются нагорья — обширные возвышенности с бугристым рельефом и с небольшим числом кратеров. Часто гребни и разделяющие их борозды приобретают линейную ориентировку, образуя горную систему или горный пояс.

Ведущая роль в строении лунных континентов принадлежит анортозитам, а также другим породам основного состава. Обнаружение анортозитов в пробах лунного вещества привлекает внимание к проблеме формирования этих пород в земных условиях. Что же такое анортозит? Ведь до последнего времени эта светлая порода, состоящая в основном из плагиоклаза с небольшой примесью темноцветных минералов, интересовала лишь немногих специалистов в области петрографии.

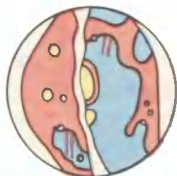
На Земле анортозиты слагают крупные интрузии Балтий-



Земля



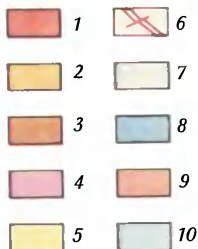
Марс



Меркурий



Луна



Основные тектонические элементы Земли, Марса, Меркурия и Луны

1 — древние щиты континентов; 2 — континентальные плиты; 3 — складчатые пояса Земли; 4 — микроконтиненты; 5 — талассоиды; 6 — главные рифты; 7 — глубоководные океанические впадины; 8 — прибрежные части океана (на Земле — шельф); 9 — кордильеры; 10 — переходные зоны между континентами и океанами

ского, Украинского, Канадского, Алданского и других щитов и являются древними магматическими образованиями. Формирование их происходило на небольшой глубине. Иногда анортозиты залегают в виде пластообразных тел среди расслоенных интрузий основного состава. Эти тела возникли в результате дифференциации магматических расплавов.

Как же возникли крупные древние массивы анортозитов на щитах?

По этому поводу давно существовала гипотеза, основанная на наблюдениях геологов, которые обратили внимание, что анортозиты приурочены к контакту древнейших осадочных пород с подстилающим их базальтовым слоем коры. Были высказаны предположения, что анортозиты являются результатом ассимиляции магмой основного состава древних осадочных пород.

Но вот в земные лаборатории поступили пробы лунного вещества. И полной неожиданностью для ученых явилось открытие, что анортозиты широко развиты на поверхности Луны. Они были обнаружены в пробах реголита, а также в виде отдельных камней светлой окраски. В реголите континентальной области, доставленном станцией «Луна-20», содержится около 50—60% анортозита.

Предположение, что анортозиты — основная составная часть лунных континентов хорошо согласуется с имеющимися данными об отражающих способностях континентальных участков и о меньшей плотности коры в их пределах. Они резко отличаются от лунных базальтов и не имеют с ними переходных разностей. В лунных условиях анортозиты, несомненно, выделились из магмы основного состава. Они образовались в наиболее раннюю стадию формирования лунной коры.

Важные черты сходства лунных и земных континентов установлены путем сопоставления данных о гравитационных полях и мощности коры. На Земле мощность коры континентов составляет 25—50 км. Интерпретация гравиметрических данных, выполненная Дж. О'Кифом для центральной части видимого полушария Луны, показала, что мощность коры здесь можно оценить величиной 40—60 км, и даже 100—150 км на ее обратной стороне. Конечно, в оценках мощности лунной коры могут быть существенные неточности, но уже сейчас несомненно, что континентам Луны, так же как и на Земле, свойственны значительные отрицательные аномалии силы тяжести — «масмины», как их назвал П. Н. Кропоткин.

Лунные моря имеют в поперечнике от 400 до 1200 км. Наиболее обширная равнинная область Луны, видимая даже

невооруженным глазом, получила название Океана Бурь. В особую группу выделяются сравнительно небольшие по размерам круговые моря округлых или овальных очертаний в плане, обычно обрамленные береговыми хребтами, или кордильерами.

Поверхность Океана Бурь и лунных морей неровная. Наряду с кратерами в их пределах прослеживаются трещины, борозды и своеобразные формы рельефа, к числу которых принадлежат купола, извилистые уступы. Обычно купола располагаются группами. Они представляют собой поднятия преимущественно округлой формы в плане диаметром в несколько километров, высотой до 0,5 км. Пологие склоны куполов не превышают 5° .

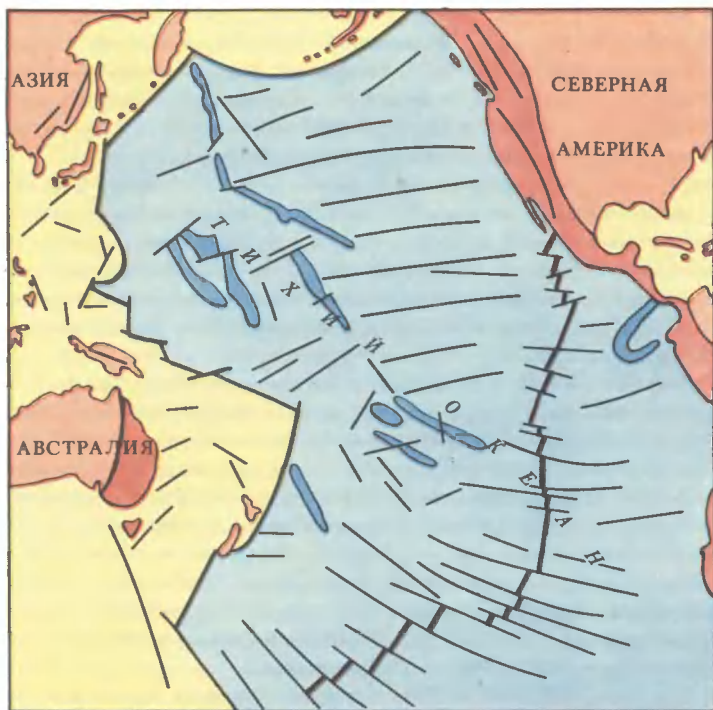
Во многих местах граница морских и континентальных областей крайне неровная, с многочисленными «заливами», что позволило исследователям высказывать предположения о заполнении лунных морей лавовым материалом, близким по составу к земным базальтам.

В краевых зонах лунных морей поверхность базальтов сравнительно ровная. Однако их мощность невелика, так как из-под них во многих местах выступают останцы более древних пород в виде отдельных, часто довольно крупных «островов». Структура их аналогична строению смежных континентальных областей. Анализируя строение таких «островов» в южной части Океана Бурь, можно проследить отдельные крупные структуры континента под покровом базальтов.

Внутренние части морей со сравнительно ровной поверхностью базальтов отличаются практически полным отсутствием каких-либо реликтов континентальных структур. В связи с этим можно предполагать, что мощность базальтов в их пределах возрастает до первых километров.

Впадины лунных морей и Океана Бурь пересечены валообразными поднятиями. Валы прослеживаются в виде пологих, но очень протяженных гряд на поверхности морей. Они имеют небольшую высоту (обычно в десятки и первые сотни метров) и очень пологие склоны. Связь их со структурами континентального обрамления прослеживается неотчетливо, хотя местами видно, что такие поднятия являются как бы непосредственным продолжением отдельных выступов или «мысов», вдающихся в пределы морских впадин.

Если сопоставить океанические впадины Земли и лунные моря, то между этими главнейшими тектоническими элементами будут обнаружены еще более разительные черты сходства. Ведь, по существу, и те, и другие являются крупнейши-



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

Тектоническое строение Тихого океана [вверху] и Океана Бурь на Луне с выделением однотипных тектонических структур

1 — континентальный (материковый) тип коры; 2 — переходный (субконтинентальный и субокеанический) тип коры; 3 — океанический тип коры; 4 — зоны внутренних валлообразных и блоково-глыбовых поднятий; 5 — кордильеры; 6 — рифтовая зона Восточно-Тихоокеанского подвижного пояса; 7 — разломы

ми депрессиями по отношению к среднему уровню поверхности. На Земле дно океанических впадин лежит на глубине 2—4 км. Поверхность лунных морей опущена на такую же глубину по отношению к условной поверхности, соответствующей среднему радиусу Луны. Ложе земных и лунных океанов на огромных пространствах заполнено базальтами.

Предположения о тектоническом сходстве лунных и земных океанических и морских впадин подтверждаются гравиметрическими данными, согласно которым лунным морям соответствуют крупные положительные аномалии силы тяжести — масконы. Так же, как и под земными океаническими впадинами, кора здесь более тонкая и сложена преимущественно базальтами.

Особое место в строении внешней оболочки Земли и ее спутника занимают переходные зоны между континентальными и океаническими областями. На Земле к этим зонам принадлежат островные дуги, глубоководные желоба и окраинные моря. Кора в таких зонах имеет промежуточное строение и мощность по сравнению с океаническими впадинами и континентами. На Луне к ним можно отнести так называемые талассоиды — крупные впадины в пределах континентов или по периферии морей, краевые участки морских впадин с многочисленными реликтами горного рельефа, имеющего континентальное строение, а также кордильеры.

Кордильеры представляют собой краевые поднятия, располагающиеся обычно вдоль границ континентальных областей и морских впадин. В большинстве случаев кордильеры протягиваются не вдоль всей границы впадины, а охватывают ее в виде дуги. Сопряжение кордильер с морскими впадинами происходит обычно по крупным прямолинейным или дуговым разломам с амплитудами вертикального перемещения в первые километры. Они выражены в виде крупных уступов.

Гравитационное поле в переходных зонах Луны имеет дифференцированный характер, что свидетельствует о неоднородном строении коры.

Марс по своей структуре четко разделяется на два полушария. Северное полушарие представляет собой гигантскую впадину океанического типа, названную Великой Северной равниной. Южное полушарие — это континентальная область с многочисленными кратерами и неоднородная по строению. Здесь выделяются участки с возвышенным рельефом, местами высотой до 5 км над средним уровнем Марса. Это своего рода ядра континентальной области. О составе пород, слагающих континентальные области Марса, можно судить толь-

ко предположительно на основании сравнения с ранними этапами формирования коры Луны и Земли. Наиболее вероятен габбро-анортозитовый состав первоначальной континентальной коры Марса. Мощность коры в пределах континентального полушария в среднем составляет около 43 км.

Океаническое северное полушарие отличается более равнинным рельефом с относительно малым числом кратеров. В приполярной области по периферии ледникового щита развиты покровы осадочных пород, мощность которых достигает многих сотен метров. На остальной территории Великой Северной равнины прямо на поверхности или под небольшим чехлом песка, нанесенного ветром, залегают покровы базальтов. Местами на детальном снимках четко видны извилистые уступы высотой в несколько десятков метров, удивительно напоминающие фронтальные уступы лавовых потоков на снимках Луны и земной поверхности. Мощность коры в пределах океанического полушария значительно ниже, чем в пределах континентального юга планеты, составляя всего 10—20 км.

Особое положение в структуре Марса занимают округлые депрессии Эллада, Аргир, Хрис, Исида. По форме и размерам они очень напоминают круговые лунные моря. Сходство дополняется тем, что они также окружены кордильерами. Рельеф этих впадин выровненный. Они, подобно Великой Северной равнине, выполнены базальтами. По гравиметрическим данным, в пределах этих впадин мощность коры минимальная и составляет 8 км во впадине Эллада. Происхождение таких впадин остается во многом дискуссионным. Возможно, их формирование было связано со взрывом гигантского метеорита астероидных размеров. В этом случае кордильеры следует рассматривать как реликты вала, окружающего кратер. Однако это было только началом сложного процесса. Под днищем кратера образовалась ослабленная и частично раздробленная кора с повышенной проницаемостью, а выброс больших количеств материала привел к компенсационной неуравновешенности. В результате осуществился подъем кровли мантии с выплавлением базальтовой магмы и ее проникновением к поверхности в пределах депрессии. Вал кратера под действием тектонических движений вследствие подъема мантии и базальтов оказался разбитым на сложную систему блоков и приобрел облик современных кордильер.

Приэкваториальная область Марса является своеобразной переходной зоной между континентальным и океаническим полушариями. Здесь выделяются два гигантских поднятия Фарсида и Элизий. Они имеют форму пологих куполовидных взду-

тий. Поднятие Фарсида в центральной части воздымается почти на 10 км над средней поверхностью Марса. В этом же поясе находится рифтовая система Маринер и так называемые хаосы и лабиринты с высокой раздробленностью коры. Для области сочленения континентального и океанического полушарий характерна повышенная тектоническая активность. Как тут не вспомнить о Тихоокеанском тектоническом поясе — глобальном разделе между двумя сегментами земной литосферы. Мощность коры в пределах поднятия Фарсида достигает, по имеющимся геофизическим данным, примерно 77 км.

Структура поверхности Меркурия изучена пока недостаточно. Известно лишь, что большие пространства имеют континентальное строение, резко отличные от единственной крупной впадины Калорис. В пределах континентальной части наиболее древними участками являются межкратерные равнины, испещренные мелкими кратерами.

Аналогом лунных морей на Меркурии является впадина Калорис. Подобно Тихоокеанской впадине Земли и обширной депрессии Океана Бурь на Луне, впадина Калорис на Меркурии представляет собой депрессию планетарного порядка. Диаметр впадины Калорис 1300 км. Она имеет концентрическое строение.

В целом морские равнины Меркурия по характеру поверхности сильно отличаются от континентальной части. Поверхность их преимущественно гладкая, хотя местами во впадине Калорис резко выделяются трещины, уступы и гребни. Равнины Меркурия имеют несколько более красноватую окраску по сравнению с окружающими горами. Они сложены породами предположительно вулканического происхождения, аналогично морским впадинам Луны, выполненным базальтовыми лавами.

Впадина Калорис обрамлена валом, состоящим из сглаженных горных массивов высотой 1—2 км, разделенных пологими депрессиями. По периферии вала развиты холмистые равнины с округлыми изолированными холмами поперечником 1—3 км высотой 0,1—0,2 км. В 600—800 км от впадины Калорис намечается пологий внешний вал, образованный небольшими холмами поперечником в 1—2 км при высоте в десятки метров.

Сведения о структуре поверхности Венеры, основанные на радиолокационном зондировании, пока еще не очень надежны, чтобы уверенно судить о возможности выделения аналогов земных континентов и океанических впадин. Первоначально по радиолокационным наблюдениям с помощью наземных средств были установлены обширные образования округлой формы, ко-

которые сопоставлялись с лунными круговыми морями. В дальнейшем при радиолокационном обзоре со спутников Венеры оказалось, что рельеф этой планеты более сложен.

И все-таки в строении планет земной группы проявляется закономерность фундаментального порядка: обособляются континентальные поднятия и депрессии, выполненные базальтами. Под континентами кора более мощная и относительно менее плотная по сравнению с корой океанического типа. Эта закономерность должна учитываться при глобальных тектонических построениях, хотя сам механизм формирования океанической коры может быть существенно различным у разных планет. В земных условиях образование океанической коры объясняется с разных позиций. Одни исследователи, например В. В. Белоусов, связывают образование океанических впадин с базификацией или океанизацией коры в результате расщепленного подъема глубинного материала. Вероятно, аналогичный процесс проявлен особенно широко на других планетных телах. Другие — сторонники «новой глобальной тектоники» связывают формирование океанической коры с раздвижением литосферных плит, сопровождаемым подъемом глубинного материала вдоль таких расколов (по рифтовым трещинам срединно-океанических хребтов). Данные сравнительной планетологии и геотектоники позволяют высказать предположение, что в земных условиях могут реализовываться оба процесса становления коры океанического типа.



Вулканизм планет

На всех планетах земной группы и крупных спутниках широко распространены вулканические породы. Эти породы формировались на протяжении всей эволюции планетных тел. Однако современный активный вулканизм, помимо Земли, обнаружен только на спутнике Юпитера — Ио.

Вулканические породы образуются из магмы, достигшей поверхности планеты. По содержанию кремнезема вулканические породы подразделяются на основные, средние и кислые. Эти породы образуются в результате излияния лавы. Различают вулканические аппараты двух главных типов: центрального и трещинного. У вулкана центрального типа извержения происходят чаще всего из постоянного выводного канала — жерла. В трещинных вулканах подводящим каналом служит трещина, вдоль которой происходят извержения.

Вулканические процессы, имеющие широкое развитие на Земле, достаточно хорошо изучены и описаны многими исследователями. Всего на поверхности Земли известно свыше 800 действующих вулканов. Две трети из них сосредоточены на берегах и островах Тихого океана. На Земле установлено также огромное количество потухших вулканов. Только на дне Тихого океана в настоящее время насчитывается около 1000 гор вулканического происхождения высотой более 1 км. Все, или почти все подводные горы — это вулканы.

Наиболее крупными вулканами на Земле являются: Килиманджаро в Африке (5895 м), Котопахи (5897 м) и Мисти (5821 м) в Южной Америке, Орисаба (5700 м) и Попокатепетль (5452 м) в Мексике, Мауна-Кеа (4205 м) на Гавайских островах и др. У нас в стране много активных вулканов на Камчатке.

Ежегодная «производительность» всех активных вулканов Земли равна 3—6 млрд. т извергаемого вещества. Это значит, что из недр Земли на поверхность ежегодно поступает огромное количество расплавленного материала с температурой выше 1000° С: пепла, шлаков, вулканических бомб, излившихся потоков лавы и т. п.

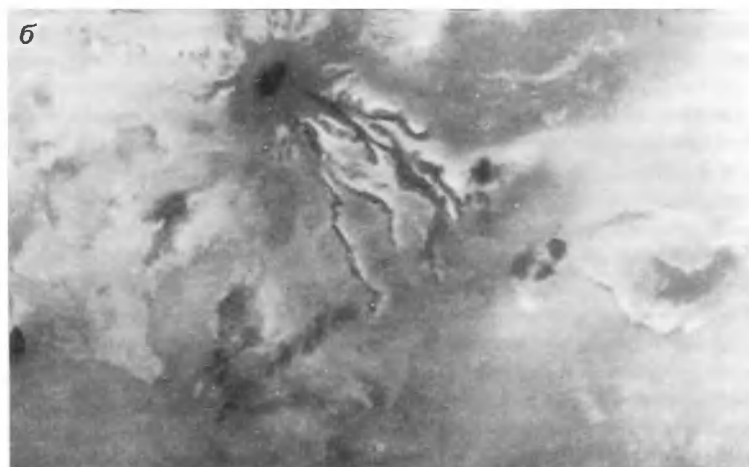
Таким образом, вулканизм — это очень важный процесс в формировании внешней оболочки Земли.

Другим небесным телом, на котором достоверно установлена современная активная вулканическая деятельность, является ближайший спутник Юпитера — Ио. Его диаметр равен 3640 км, что примерно на 150 км больше диаметра Луны. На поверхности этого спутника отмечены темные кратеры, вокруг которых обычно видны потоки лавы. На ряде снимков, полученных со станции «Вояджер-1», обнаружены явные следы активного вулканизма. Бледные зеленовато-белые облака вулканических выбросов простирались до высот 100—280 км. Скорость выбросов достигала 1 км/с. Кальдера* одного из вулканов представляет собой кольцевую структуру диаметром около 300 км. Анализ снимков позволил обнаружить на поверхности Ио семь активных вулканов, которые неоднократно извергались в течение тех четырех суток, когда находились в поле зрения телекамер станции. Через четыре месяца, во время полета другой станции, не менее шести из ранее обнаруженных вулканов продолжали свою активную вулканическую деятельность.

Извержения вулканов на Ио носят взрывной (эксплозивный) характер. Подобная вулканическая деятельность на Земле происходит при активном участии водяных паров. Вулканические взрывы при извержении вулканов на Ио обусловлены, по-видимому, присутствием сернистого газа. Ученые считают, что недра Ио почти полностью расплавлены из-за очень активного приливного воздействия Юпитера, а поверхность Ио покрыта слоем серы толщиной в несколько километров. Взаимодействие раскаленных недр с поверхностным слоем серы привело к образованию на Ио атмосферы, ионосферы и образованию вдоль орбиты торового кольца, состоящего из заряженных частиц. Его взаимодействие с магнитосферой Юпитера приводит к грандиозным «полярным сияниям».

Полученные первые доказательства современного вззем-

* Кальдера — циркообразная впадина с крутыми стенками и плоским дном. образуется вследствие проседания конуса вулкана.



Спутник Юпитера — Ио

На верхнем снимке (а) стрелкой указаны места газово-пепловых выбросов из вулканов. На нижнем (б) — четко видны вулканический кратер и лавовые потоки

ного вулканизма свидетельствуют о том, что Ио является небесным телом, вулканически гораздо более активным, чем Земля. Предварительные оценки ученых по изучению интенсивности вулканической деятельности на Ио указывают, что по-

верхность этого спутника преобразуется со скоростью 1 мм в год. Цифра эта в геологическом масштабе времени весьма внушительная. Постоянное обновление поверхности происходит в результате излияний лавы и выбросов материала из жерл вулканов.

В результате изучения многочисленных фотографий Луны и непосредственного изучения человеком ее поверхности и состава грунта было сделано заключение о том, что поверхность лунных морей и Океана Бурь слагается древними вулканическими породами основного состава — базальтами.

Вулканическая деятельность на Луне закончилась около 3 млрд. лет назад. Однако имеются факты, которые иногда трактуются отдельными исследователями как признаки современной вулканической деятельности. Так, например, советский астроном Н. А. Козырев 23 октября 1959 г. в кратере Альфонс отметил вспышки, которые он объяснял как извержение вулкана.

Рельеф лунных морей и Океана Бурь характеризуется такими же формами, что и в вулканических областях Земли. Это лавовые потоки и покровы, ограничивающие их извилистые уступы, трещины — рилли, вулканические купола. Здесь широко развиты валы и гряды, протяженные (10—30 км), а также извилистые. Их происхождение не совсем ясно. Предполагается, что это могут быть дайки — застывшие в трещинах магматические породы, образующие вертикальные или крутопадающие стенки, или выступы фундамента, облекаемые лавой.

Радиологические определения показывают, что возраст лунных базальтов измеряется интервалом 4—3 млрд. лет.

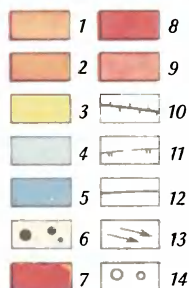
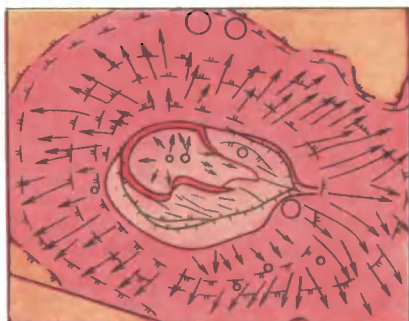
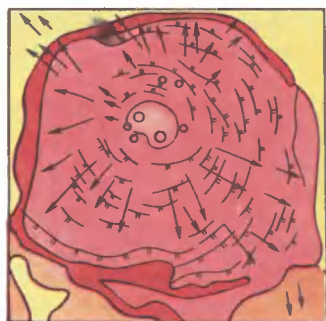
Есть все основания предположить, что вулканические породы широко распространены и на поверхности Меркурия. Здесь выделяются аналоги лунных морей, прежде всего огромная впадина Калорис (Море Жары). Поверхность ее преимущественно гладкая, однако прослеживаются уступы извилистой формы, напоминающие фронтальные ограничения лавовых потоков на Луне. В отличие от Луны, где высота уступов составляет всего десятки метров, на Меркурии она достигает 200—500 м. Причина этих различий может быть объяснена более вязким составом лав Меркурия. Не исключено, что это связано с гораздо большей силой тяжести на поверхности (более чем в 2 раза), чем у Луны. Высокая средняя плотность пород планеты дает основания для предположений о том, что морские впадины Меркурия могут быть выполнены лавами, близкими по составу к мантийному веществу. О возрасте вулканизма на Меркурии можно судить по степени насыщения его поверхности



г. Олимп



Аполлонова патера



Вулканы Марса

Внизу — карта щитовых вулканов. Вверху — фотографии и схемы дешифрирования вулканов Олимп и Аполлонова патера

- 1 — континентальная поверхность; 2 — древние вулканические покровы;
 3 — молодые вулканические покровы; 4 — океаническая область;
 5 — талассоиды; 6 — щитовые вулканы; 7 — крупные уступы, 8 — лавовые потоки;
 9 — внутренняя часть кальдеры, днище кальдеры; 10 — вал кальдеры,
 11 — уступы в пределах лавовых покровов; 12 — разломы;

кратерами. Предполагается, что он близок ко времени формирования лунных базальтов.

Несмотря на широкое развитие вулканических пород на поверхности Меркурия, вулканические аппараты центрального типа до недавнего времени были неизвестны. Лишь тщательный анализ космических снимков позволил Г. Н. Каттерфельду обнаружить около полутора десятков построек, схожих со щитовыми вулканами и куполами. Их высоты и диаметры незначительны. Самый крупный из них находится в центре холмистой вулканической равнины Одина, расположенной между кордильерой Знойных гор (на западе) и хребтом Скиапарелли (на востоке) и имеет диаметр 7 км и высоту около 1,5 км.

Г. Н. Каттерфельд предполагает существование крупного вулканического поднятия в центре Моря Марса, увенчанного огромным вулканом с диаметром основания свыше 100 км. Этот щитовой вулкан имеет двойную вершинную кальдеру. По его мнению, возраст этой вулканической постройки очень древний, приблизительно соответствующий раннему протерозою Земли (до 1 млрд. 600 млн. лет). Предположения Г. Н. Каттерфельда представляют большой научный интерес и требуют дальнейшего подтверждения.

О развитии вулканизма на Венере можно судить на основании состава атмосферы, облика поверхности на панорамах, переданных со спускаемых аппаратов станций «Венера-9» — «Венера-14», а также по данным радиолокационных исследований. Выделяются обширные темные области с поперечником около 1000 км, которые можно рассматривать в качестве аналогов лунных морей, выполненных базальтами.

Исследования Марса с помощью телевизионных снимков позволили установить широкое распространение вулканических образований. К ним относятся обширные равнины океанического типа, занимающие большую часть северного полушария Марса (Ацидалийская, Амазония и др.), а также краевые и внутриконтинентальные плато, увенчанные вулканическими аппаратами (плато Гесперия), круговые депрессии (Эллада и Аргир), плоские днища отдельных наиболее крупных древних кратеров (Скиапарелли, Гюйгенс, Антониади). Все эти области имеют одинаковое строение рельефа с преобладанием выров-

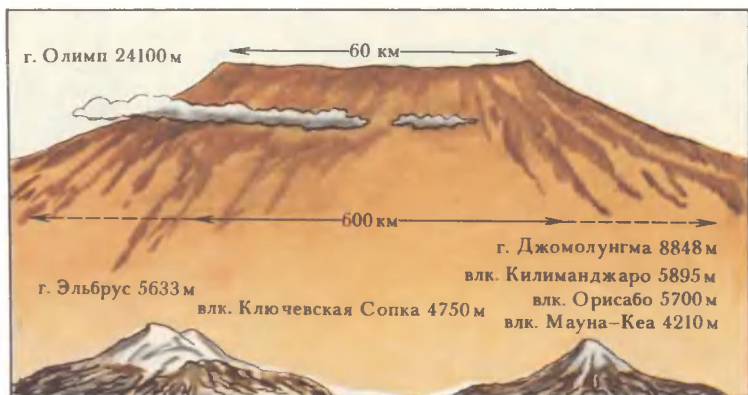
13 — направление распространения лавовых потоков; 14 — вершинные кратеры. Номера на карте. 1 — патера Альба; 2 — патера Урана, 3 — купол Керавнский; 4 — г. Олимп; 5 — г. Аскрийская; 6 — купол Фарсида; 7 — г. Павлина; 8 — г. Арсия; 9 — г. Гекаты; 10 — г. Элизий; 11 — Аполлонова патера, 12 — Тирренская патера; 13 — Адриатическая патера

ненных поверхностей, в пределах которых расположены извилистые уступы — ограничения лавовых покровов. По своему облику они близки к морям Луны, для которых установлено повсеместное развитие базальтов.

О возрасте вулканических покровов океанических равнин Марса можно судить пока по косвенным данным, основываясь на степени насыщенности кратерами. Предполагается, что основная масса излияний имела место в интервале 2—1 млрд. лет, т. е. значительно позднее, чем на Луне. Очевидно, в это время преобладали трещинные излияния, и вулканизм имел планетарные масштабы, в результате чего лавами были покрыты обширные площади. Формирование вулканических покровов было длительным, с выделением не менее двух основных эпох вулканизма. Значительный вулканизм был проявлен и в более ранние (доокеанические) эпохи развития континентов. Кроме того, на континентах зафиксированы более молодые фазы вулканической деятельности.

Если на Луне после формирования базальтовых «морей» и «океана» вулканическая деятельность стала ослабевать, то на Марсе активная вулканическая деятельность проявилась и на более поздних этапах развития планеты — в послеокеаническую эпоху. Проявления вулканизма этого времени сконцентрированы в пределах сводовых поднятий Фарсида и Элизий, на плато Гесперия и в северном приполярном регионе. На плато Гесперия расположен сравнительно небольшой вулкан Тирренский высотой около 1 км, с пологими склонами и вершиной, увенчанной кальдерой неправильной формы.

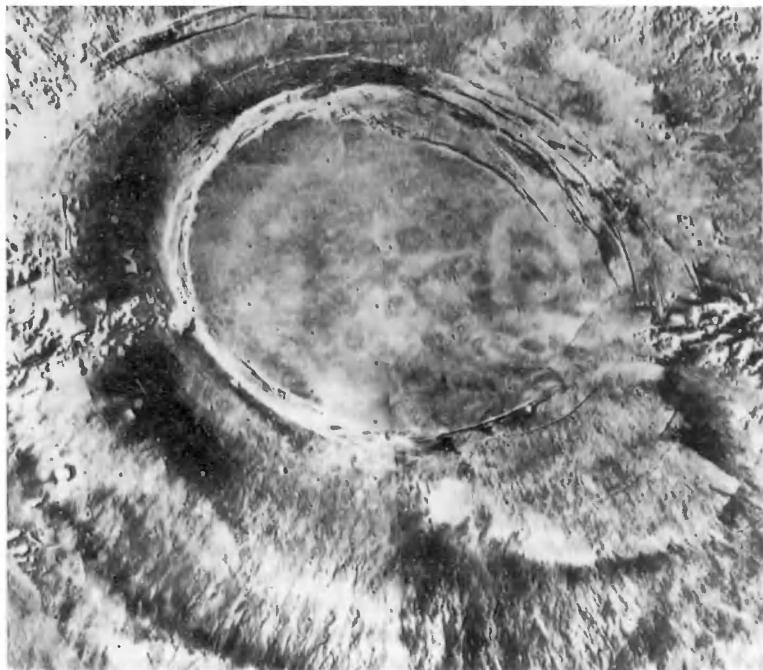
Крупные вулканические сооружения Марса расположены в центре гигантского сводового поднятия. Вулканическая активность была здесь сложной и длительной. К наиболее древним следам ее проявления следует отнести остатки вулканических построек к северу от горы Олимпа и в районе патеры Альба. На снимках поверхности и фотокартах они имеют вид округлых, очень пологих поднятий, изборожденных множеством трещин и гребней. Иногда намечается радиально-концентрический структурный рисунок, характерный для древних вулкано-тектонических кольцевых структур Земли. Центральные части их плоские, но здесь можно наметить реликты округлых кальдерообразных депрессий. К северу от горы Олимпа можно даже предполагать наложение нескольких генераций щитовых вулканов этой стадии. Их поперечник составляет 750—850 км. Над окружающей местностью они возвышаются на 0,5 км. Вероятно, образование этих щитовых вулканов связано с ранними стадиями формирования сводового поднятия Фарсида.



Марсианский вулкан-гигант Олимп и некоторые земные вулканы

Затем возникли кальдеры пaterы Альба и пaterы Урания. Это пологие, сильно разрушенные поднятия высотой 0,2—0,3 км и диаметром основания 250—300 км. Они увенчаны отчетливо выраженными кальдерами диаметром 75—100 км неправильной формы. Дешифрирование детальных снимков показало, что пatera Альба — сложное вулканическое сооружение с лавовыми потоками нескольких возрастных генераций.

На последней стадии вулканизма возникли те гигантские щитовые вулканы, которые так четко видны на снимках Марса. К ним относится щитовой вулкан свода Фарсида — гора Олимп. Вулкан находится в северо-западной части свода, где высота свода сравнительно небольшая, так что относительное превышение вулкана составляет 24 км. Вершина вулкана увенчана обширной кальдерой диаметром 65 км. В ее внутренней части видны крутые уступы и два кратера диаметром около 20 км. С внешней стороны кальдера окружена сравнительно крутым конусом. Далее к периферии расстилаются пологонаклонные поверхности с радиальным рисунком лавовых потоков, обрушенных лавовых каналов, фестончатых уступов, ограничивающих отдельные потоки. Более молодые потоки располагаются ближе к вершине. Это указывает на постепенное угасание вулканической активности. Щитовой вулкан Олимп ограничивается по периферии крутыми и довольно высокими уступами, возвышающимися от 1 до 4 км над окружающим плато. Происхождение их пока не получило удовлетворительного объяснения. Не исключено, что формирование подобных уступов



Один из крупнейших вулканов Марса — Арсия

Четко видно плоское днище кальдеры, которое окружено валами и гребнями; во внутренней части кальдеры прослеживаются уступы и протяженные кольцевые дайки, разбитые разрывными нарушениями

следует объяснять относительно повышенной вязкостью магмы горы Олимпа, являющейся возможно более кислой и отвечающей андезитовой лаве. Такое предположение согласуется с данными о его более значительной высоте по сравнению с близко расположенными другими вулканами свода Фарсида. Вулканическое сооружение горы Олимпа по ширине вдвое превышает наиболее крупный из Гавайских вулканов Земли, а по объему оно примерно равно массе изверженных пород всей Гавайской островной гряды.

Щитовые вулканы свода Фарсида — Арсия, Павлина и Аскрийский вытянуты в цепочку северо-восточного направления. Протяженность этой цепочки 1800 км. Поперечник каждого из них составляет около 300 км. Превышения над поверхностью —

17 км. Гора Арсия выделяется своей кальдерой в виде правильного круга диаметром 125 км.

У щитовых вулканов свода Фарсида намечаются дуговые разломы по их периферии. Образование подобных трещин вполне закономерно объясняется развитием гигантских вулканических центров, опустошением вулканических камер в процессе извержений с проявлением соответствующих напряжений. Как уже отмечалось, подобные дуговидные разломы, характерные для многих вулканических областей Земли, приводят к формированию многочисленных вулкано-тектонических кольцевых структур.

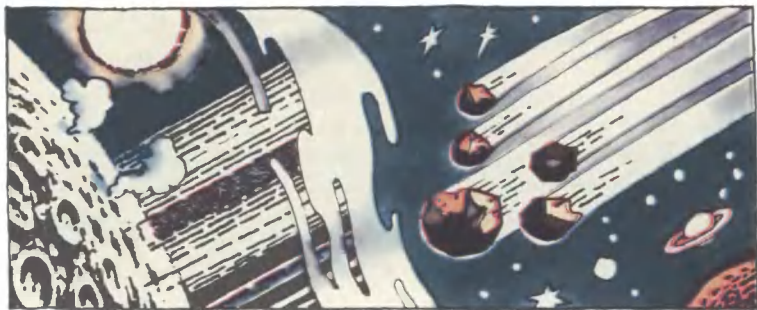
Большая группа вулканических куполов расположена на крайнем севере Марса, вблизи северного полярного ледникового щита (Кисон, Ортигии, Яксарт).

Отдельные купола и кальдеры явно вулканического происхождения обнаруживаются и в пределах континентальной области (патеры: Аполлонова, Адриатическая, Амфитриты). Вероятно, при дальнейшем изучении Марса с получением более качественных снимков во многих районах будут выявлены дополнительно небольшие вулканические аппараты.

Большинство исследователей считает, что наиболее молодой (послеокеанический) вулканизм Марса был проявлен в интервале 500—200 млн. лет назад. Другие — определяют возраст вулканизма Марса в 3,8—3,4 млрд. лет, допуская лишь для вулкана Олимп возраст в 2,5 млрд. лет.

Представляет особый интерес сопоставление процессов вулканизма Марса и других планет земной группы. У Луны формирование океанических впадин, выполненных базальтовыми покровами, происходило 4—3 млрд. лет назад, а достоверные более молодые проявления вулканизма неизвестны. Близкое развитие процессов вулканизма имело место и на Меркурии. На Земле на протяжении всей тектонической эволюции отмечается интенсивный вулканизм. Таким образом, Марс занимает промежуточное положение по характеру вулканизма, что вполне определенно связывается с промежуточными значениями его массы, определившей характер эндогенных процессов.

Проведенное сопоставление имеющихся данных о распространенности, особенностях и времени проявления основного вулканизма в эволюции планет земной группы показывает его большую роль в формировании кор всех планет, а также позволяет сопоставить длительность процесса вулканизма с массами планет и заключенными в них резервами внутренней энергии.



Метеоритная бомбардировка планет

На снимках Марса, Меркурия, Луны и других небесных тел отчетливо видны многочисленные кольцевые образования — кратеры различных диаметров. Какого же они происхождения? В настоящее время большинство исследователей связывают эти структуры с метеоритной бомбардировкой. И действительно, чем, кроме метеоритной бомбардировки, можно объяснить происхождение кратеров — астроблем на спутниках Марса Фобосе и Деймосе. Ведь это — угловатые глыбы размером в первые десятки километров, для которых нельзя допустить процессов вулканизма.

Для Луны, Меркурия и Марса метеоритная бомбардировка очевидна. Кратеры — наиболее распространенная форма рельефа. Они составляют непрерывный по размерам ряд от микроструктур до гигантских бассейнов, имеющих тысячи километров в поперечнике. На безатмосферных небесных телах (Меркурий, Луна, Фобос, Деймос и др.) метеоритные кратеры сохранились в прекрасном состоянии. В отличие от разрушенных и погребенных земных астроблем, на космических изображениях поверхности планет земной группы и их спутников отчетливо видны все детали строения метеоритных кратеров.

Кольцевой вал — насыпная структура, обрамляющая кратер. Как правило, вал асимметричен, так как его внутренний склон круче внешнего. Объем кольцевого вала для метеоритных (импактных) структур обычно составляет 20—40% от объема выброшенной породы.

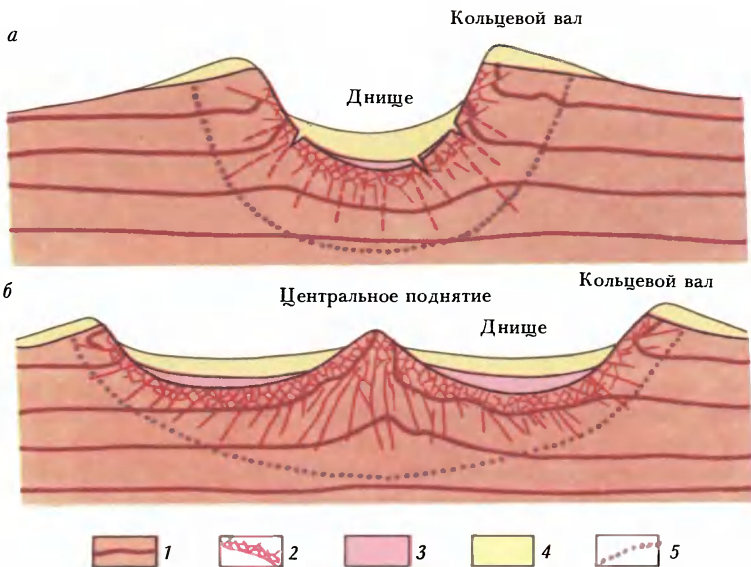
Днище кратеров имеет различное сечение (плоскодонное, чашеобразное и т. п.); его форма и строение усложняют-

ся с увеличением поперечника — днища крупных кратеров осложнены трещинами, рывтинами, буграми, центральными горками. Центральная горка, или центральный пик, образуется в кратерах диаметром от 5 до 50 км. Ее образование объясняется согласно законам механики упругой отдачи пород поверхности — слоистой мишени. В кратерах диаметром более 50 км образуется система центральных кольцевых поднятий.

Импактные структуры более молодого возраста имеют лучшую сохранность. Это правило может быть использовано для относительной датировки кратерированных поверхностей планет земной группы. Степень разрушения кратеров зависит от воздействия внутренних — эндогенных и поверхностных — экзогенных процессов: тектонических деформаций вулканизма, выветривания и т. п. Однако разрушительное действие этих факторов на планетах земной группы незначительно, и кратеры выглядят достаточно «свежими». Было установлено, что скорость разрушения структуры находится в зависимости от ее диаметра: чем меньше структура, тем быстрее она уничтожается. Быстрее всего разрушается рельеф рыхлых выбросов из кратеров.

Изучение снимков поверхности Марса позволило по степени сохранности кратеров выделить и описать четыре их возрастных генерации, названные по наименованиям характерных кратеров — королёвская, ломоносовская, кеплеровская и ньютоновская. К королёвской генерации отнесены наиболее свежие молодые кратеры хорошей сохранности диаметром преимущественно меньше 30 км. Они имеют резко выраженные валы, относительно гладкие склоны, отчетливые выбросы. Ломоносовская генерация объединяет кратеры размером от 30 до 100 км, подвергшиеся некоторым вторичным изменениям. Валы кратеров достаточно хорошо выражены, но уже сглажены, часто состоят из отдельных фрагментов. Склоны разрушены гравитационными и эоловыми процессами. Выбросы видны достаточно хорошо. К кеплеровской генерации относятся кратеры размером от 100 до 200 км, в значительной степени разрушенные. Их валы представлены отдельными фрагментами, часто образующими не кольцевую, а близкую по форме структуру. Дно кратеров под воздействием эндогенных и экзогенных процессов выровнено. Редко видны останцы центральных горок. Выбросы обычно не сохраняются. К ньютоновской генерации относят почти целиком разрушенные структуры диаметром часто свыше 200 км.

Среди импактных кратеров перечисленных генераций на Марсе установлены ударные структуры-гиганты поперечником



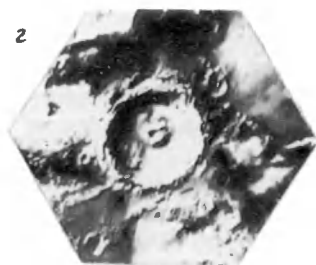
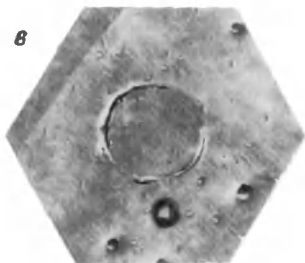
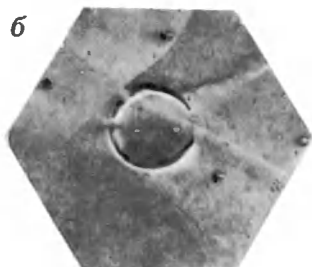
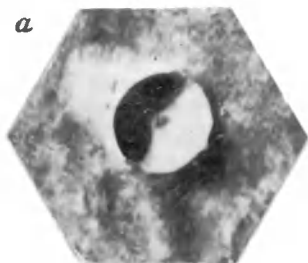
Строение простого (а) и сложного (б) метеоритного кратера

- 1 — породы цоколя; 2, 3 — брекчия (2 — остающаяся на месте, 3 — перемещенная); 4 — переплавленные, измененные породы (импактиты); 5 — граница зоны деформации

до 1800 км. На плоском дне этих впадин, обычно расположенном на 3—4 км ниже среднего высотного уровня планеты, видны лишь отдельные импактные кратеры небольших размеров и хорошей сохранности. Эти депрессии иногда являются вместилищем эоловых накоплений.

По периферии впадин развиты кордильеры — кольцевые горные поднятия с расчлененным рельефом. В плане они имеют форму сегментов шириной 200—300 км. Название «кордильеры» принято по аналогии с лунными кордильерами, которые примыкают к круговым морям. К подобным тектоническим сооружениям можно отнести и краевые поднятия в обрамлении Тихого океана (кордильеры Северной и Южной Америки). Их образование на всех планетах несомненно связывается с формированием самих круговых депрессий.

Круговые впадины и кордильеры сопровождаются радиально-концентрическими системами разломов. Впадины ограничены резкими кольцевыми уступами высотой 1—4 км, возможно, разломной природы. Местами дуговые разломы вид-



Метеоритные кратеры Марса различных возрастных генераций

а — королевской (новейшей), б — ломоносовской (новой), в — кеплеровской (древней), г — ньютоновской (древнейшей)

ны в пределах кордильер. По периферии круговых впадин намечаются радиальные разломы. По аналогии с Луной эти структуры названы талассоидами. К талассоидам на Марсе относятся впадины Аргир, Эллада, Хрис и Исида.

Обращает на себя внимание определенная закономерность в их расположении на поверхности Марса. Две северные структуры Исида и Хрис находятся примерно на одной широте на границе «океан»—«континент». Два южных талассоида Аргир и Эллада располагаются также на одной широте, но в пределах континентальной части планеты, причем Хрис и Аргир вытянуты по одному меридиану, Эллада и Исида соответственно — по другому, более восточному. В целом же эти структуры расположены по углам огромного прямоугольника. Научного объяснения этот факт пока еще не получил.

Как же возникли талассоиды на Марсе? Вопрос этот очень сложен. С одной стороны, они напоминают гигантские кратеры, для которых можно допускать образование при взрыве метеоритов астероидных размеров — так называемых планетезималей. При этом остаточные массы этих тел, скрытые под

базальтовым выполнением и песчаными наносами впадин, явились источниками значительных положительных аномалий силы тяжести — «масконами».

В связи с импактной гипотезой интересно отметить оригинальное предположение американского ученого Г. Максуини. По его мнению, несколько необычных по составу метеоритов, в том числе два недавно найденных в Антарктиде, попали на Землю с Марса. Вероятно, что в Марс врезался и взорвался такой огромный метеорит, куски породы которого в результате мощнейшего взрыва были выброшены за пределы планеты и достигли поверхности Земли. Не являются ли эти «посланцы» с Марса свидетелями образования талассоидов на этой планете?

По другой гипотезе талассоиды — продукт глубинных тектонических преобразований.

На Луне выделяются три возрастных группы импактных структур.

Коперниковская (самая молодая) группа объединяет кратеры с четко выраженными валами высокой степени сохранности, с крутыми внешними и внутренними склонами.

К птолемеевской группе относятся кратеры с валами, достаточно высоко поднимающимися над днищем. Часто валы имеют сложное строение благодаря развитию многочисленных мелких более молодых кратеров. Наряду с плоскими днищами имеются днища сложного строения с отдельными центральными пиками и центральными хребтами.

Структуры доптолемеевской (древней) группы характеризуются сильно разрушенными валами, часто лишь слабо возвышающимися над поверхностью материковых областей. Иногда такие валы только намечены концентрическими грядами и отдельными пологими холмами. В других случаях они расчленены системами гребней, образующими ряд субпараллельных линий. У наиболее крупных древних кратеров имеются обширные плоские днища, частично осложненные более молодыми кратерами.

Большое значение для установления относительного возраста различных поверхностей планет играет плотность кратерирования: чем древнее поверхность, тем большее количество соударений с метеоритными телами она должна была испытать. Таким образом, относительно древняя поверхность на фотографическом изображении той или иной планеты должна выглядеть наиболее интенсивно кратерированной. Используя это правило, на некоторых планетах земной группы удалось выделить разновозрастные структуры.

Луна является хорошо изученным к настоящему времени небесным телом. Отсутствие явных признаков эндогенной и экзогенной активности на ней обусловили хорошую сохранность импактных структур, неравномерное распределение которых показало, что предела насыщения импактные кратеры достигают в древних материковых областях. В молодых морских депрессиях кратерирование минимально. Оценки абсолютного возраста образцов лунных пород показали, что на ее поверхности наряду с молодыми кратерами существуют ударные структуры, возраст которых является весьма внушительным и равен 4,4—3,8 млрд. лет.

На Марсе в основу определения относительного возраста тектонических процессов положены результаты анализа плотности распределения импактных кратеров, их морфологические особенности, сохранность и размеры, а также геологические соотношения различных поверхностей. Используя этот принцип, авторам настоящей работы удалось выделить на этой планете несколько типов поверхностей с четкими границами, в пределах которых кратеры распространены равномерно, и их количество на единицу площади остается постоянным. По аналогии с Луной Марс также на ранних этапах своего развития подвергался интенсивной метеоритной бомбардировке, которая 3,0—3,5 млрд. лет назад сократилась примерно до современного уровня.

Небезынтересно знать, как велись расчеты плотности кратерирования. Под плотностью кратерирования понималось либо количество кратеров определенных диаметров на единицу площади, либо отношение суммарной площади кратеров большего определенного диаметра к площади рассматриваемой поверхности. Наиболее подходящими для подсчета оказались кратеры диаметром от 4 до 10 км на площади 10 млн. км², так как количество их достаточно для статистической обработки, а скорость разрушения не так велика, как у более мелких структур.

Получив значения плотности кратерирования различных поверхностей Луны и других планет, в частности Марса, и значения абсолютного возраста пород Луны, можно, используя сравнительно-планетологический метод, установить абсолютный возраст поверхности Марса.

Метеоритная бомбардировка играет существенную роль на ранних стадиях развития планет. Метеоритные кратеры имеют важное значение для датировки различных структурных поверхностей. Метеоритная бомбардировка является процессом, общим для формирования рельефа поверхности и структуры коры планет земной группы, в том числе и Земли.

Космические снимки Земли показали, что и на нашей планете имеется большое количество кольцевых структур. При их исследовании была установлена одна интересная особенность: чем древнее изучаемый комплекс пород, тем большее количество кольцевых структур на нем дешифрируется. Многие из них были обнаружены в фундаменте под чехлом рыхлых пород. Особенно много кольцевых структур выявлено на древних платформах — наиболее стабильных областях литосферы. Диаметр этих структур разнообразен и варьирует в широких пределах от сотен метров до десятков и сотен километров. Окончательно вопрос о происхождении многих кольцевых структур на Земле пока еще не решен. Несомненно, что эти структуры имеют различное происхождение. Однако часть их представляет собой разрушенные древние метеоритные кратеры, аналогичные тем, которые повсеместно покрывают поверхности других планетных тел.

Многие исследователи считают, что метеоритная бомбардировка Земли являлась главнейшим процессом на догеологической стадии ее развития. К сожалению, следы этой ранней метеоритной бомбардировки Земли оказались стертыми последующими процессами ее геологического развития — тектоническими движениями, магматизмом и метаморфизмом. Благодаря этому, и в особенности благодаря разрушительному воздействию атмосферы и гидросферы в настоящее время следы метеоритной бомбардировки Земли реконструируются с большим трудом.

Советские геологи и геофизики В. В. Федынский, В. Л. Масайтис, М. В. Селивановская, Б. С. Зейлик, А. И. Дабижа, В. И. Фельдман, А. А. Вальтер и многие другие подробно изучили структуры, образованные на поверхности Земли в результате метеоритной бомбардировки. Эти структуры получили название импактных космогенных, или метеоритных.

Зависимость возраста поверхностей Марса от плотности их кратерирования

Поверхности	Плотность кратерирования (4—10 км)	Абсолютный возраст в млрд. лет (ориентировочно)
Древних частей континентов	250—140	Более 4,0
Кордильер талассоидов	220—170	Более 4,0
Относительно молодых частей континентов	160—130	Около 4,0
Океанов	100—50	1,5—0,7
Новейших лавовых покровов	30—10	0,5—0,2



Схематическая карта астроблем Земли

Различают два типа метеоритных кратеров: ударные — диаметром менее 100 м и взрывные — диаметром более 100 м. Первые являются результатом падения небольшого метеорита; вторые возникают при взрыве после некоторого заглубления метеорита в породы мишени.

В настоящее время на Земле установлено около 100 ударных структур, или астроблем, названных так в 1960 г. американским геологом Р. Дитцем. Астроблема в переводе с греческого означает «звездная рана». Распределение астроблем на поверхности Земли неравномерно: в Европе их насчитывается 30, в Северной Америке — 26, Южной Америке — 2, Австралии — 9, Африке — 18, Азии — 14. Изученные астроблемы морфологически очень похожи на кратеры Луны, Марса, Меркурия. Они имеют округлую в плане форму, диаметр до 100 км и выявляются по характерному насыпному валу, выступающему в виде возвышенности вокруг воронки, по наличию центрального поднятия — центральной горки, по отчетливому радиально-кольцевому расположению трещин, по присутствию раздробленных пород, следов сотрясений и другим признакам. Однако самым надежным критерием их выделения является обнаружение остатков метеоритного вещества и специфических изменений в породах, происшедших в результате воздействия взрывной волны и высокой температуры при взрыве. Было рассчитано, что при столкновении с горными породами метеоритов, движущихся со скоростью более

3—4 км/с, начальное давление должно равняться 10^9 Па при температуре $10\,000^\circ\text{C}$. Рассчитанное теоретическое время воздействия ударной волны на породу — миллионные доли секунды. За эти мгновения давление резко возрастает. При образовании кратера диаметром 50 км почти мгновенно выделяется энергия, равная 10^{22} Дж. Естественно, что такая энергия не может оставить без последствий породу мишени. При давлениях от $4 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^{10}$ Па в минералах и породах происходят пластические деформации и твердофазовые переходы, а при нагрузках свыше $5 \cdot 10^{10}$ Па — плавление и частичное испарение вещества. Все эти термодинамические изменения приводят к серьезным перестройкам горных пород в районе удара.

Как же обнаружить астроблему на поверхности Земли? Ведь в настоящее время эта древняя отрицательная структура разрушена, эродирована и скрыта. В вопросе обнаружения астроблем существенную роль должны сыграть космические снимки, на которых выявлены многочисленные кольцевые образования. Так, например, Б. С. Зейликом по результатам дешифрирования космических снимков и анализу геофизических полей в Казахстане описаны следующие гигантские астроблемы — гиаблемы, требующие дальнейшего изучения: Ишимская (Тенизская) диаметром около 700 км, Прибалхашско-Илийская поперечником также около 700 км, Токрауская — 250 км, Каибско-Чуйская, Джезказганская и др.

О том, как трудно распознать на поверхности Земли ударный кратер, наглядно свидетельствует история изучения Попигайской структуры, расположенной на севере Средне-сибирского плоскогорья в бассейне р. Попигай — правого притока р. Хатанги. Эта астроблема, диаметр которой достигает 100 км, имеет округлую форму с абсолютными отметками дна 20—80 м и бортами, возвышающимися над дном на 200 м.

Попигайская структура, открытая геологами в 1946 г., в разное время рассматривалась как грабен, как эрозионная впадина, как вулканический кратер и т. п. Лишь в 1970 г. в результате тщательного анализа полевых исследований и всех имеющихся материалов В. Л. Масайтису и его коллегам удалось обосновать ее метеоритное происхождение. Было доказано, что Попигайская котловина — один из крупнейших на Земле метеоритных кратеров. Северо-восточная и восточная части дна кратера представляют собой сильно заболоченную равнину, а остальная часть дна приподнята и характеризуется расчлененным рельефом. В приподнятых частях дни-



Метеоритный кратер Эльгыгитын. Фото Л. Б. Грановского
Вид с юго-востока

ща развиты плоские возвышенности и полукольцевые гряды высотой свыше 250 м. Вдоль западного и северного бортов котловины в 50 км от ее центра выделяются прерывистые цепи возвышенностей, ориентированных параллельно бортам кратера. Структура четко фиксируется в гравитационном и магнитном полях и на космических снимках. В. Л. Масайтис выделяет в Попигайском кратере внутреннюю воронку диаметром около 75 км, заложенную в породах кристаллического фундамента, и внешнюю — диаметром 100 км, расположенную в породах осадочного чехла. Структура обрамлена центробежными разрывами. Породы, изученные в пределах структуры, претерпели глубокие изменения за счет проявления ударного метаморфизма. Они интенсивно раздроблены и переплавлены.

В. Л. Масайтис, исходя из геологической модели кратера, подсчитал примерный объем его расплавленного материала, равный примерно 1750 км^3 . По данным радиологических измерений, попигайское событие произошло 38,9 млн. лет тому назад.

В центральной части Украинского кристаллического массива, в районе с. Зеленый Гай Криворожской области, была выявлена и намечена к дальнейшему изучению Зеленогайская астроблема, которая относится к разряду достоверных космогенных структур. Эта структура, по данным В. П. Брянского, А. А. Вальтера и Л. М. Фроловой, представляет собой воронку диаметром около 1,5 км глубиной до 0,2 км. В породах воронки выявлены следы ударного метаморфизма. Были обнаружены обломки пузырчатых стекол плавления, установлены конусы разрушения пород и другие признаки.

Рассмотрим еще один ударный кратер Эльгыгытгын, расположенный на Чукотке. В рельефе кратер выражен озером диаметром 15 км и глубиной до 170 м. Озерная впадина имеет округлую форму, обрамлена валом, возвышающимся над уровнем воды на 200—400 м. Кратеру соответствуют отрицательные магнитная и гравитационная аномалии. Породы вала несут явные признаки ударного метаморфизма: содержат оплавленные стекла и высокобарические минералы (коэсит). Датировка калий-аргоновым методом определяет возраст кратера Эльгыгытгын в 3,5 млн. лет.

Достоверно установленные талласоиды на Земле неизвестны. Однако некоторые геологи относят к образованиям подобного рода Венгерскую впадину, район Мексиканского залива, Прикаспийскую впадину, район Зондских и Марианских островов и другие регионы, требующие дополнительного изучения. К структурам, также требующим дополнительного изучения, относится Центральнокольский кратер размером 250×150 км, открытый И. А. Нечаевой.

Космические снимки Земли свидетельствуют о том, что на поверхности нашей планеты кольцевые структуры представлены в изобилии. Не вызывает сомнения, что часть кольцевых образований имеет импактное происхождение и является продуктом метеоритной бомбардировки. Задача геологов заключается в дальнейшем детальном их изучении и выявлении закономерностей распределения полезных ископаемых, связанных с ударным метаморфизмом. Во всяком случае, так называемые зювиты — породы импактного происхождения из кратера Рис в ФРГ — явились прекрасным строительным материалом. Некоторые исследователи считают также, что крупное месторождение меди и никеля Седбери в Канаде приурочено к древней астроблеме. Это заключение не бесспорно, но необходимо учитывать возможность проникновения по ослабленной зоне коры под крупной астроблемой магматических расплавов и рудоносных растворов.



Гигантские трещины

В своих исследованиях геологи уделяют много внимания разломам — гигантским трещинам в земной коре; некоторые из них прослеживаются на сотни и тысячи километров. В зависимости от характера напряжений в коре возникают разломы разного типа. В условиях растяжений образуются трещины отрыва, так называемые раздвиги, а при значительной величине растяжения происходит разрыв земной коры и возникают громадные впадины — рифты. Примером такого рифта служит впадина озера Байкал, детально изученная в последние годы советскими учеными. Рифты прослежены на дне океанов вдоль срединно-океанических хребтов. Вместе с подобными структурами на континентах они образуют мировую рифтовую систему. Рифты намечают положение границ между плитами литосферы. Вдоль них концентрируются очаги землетрясений и вулканические аппараты.

При сжатии горные породы сминаются в складки, сопровождаемые разрывами типа взбросов и надвигов. При большой величине сжатия возникают шарьяжи, при которых пластины горных пород наползают друг на друга, перемещаясь иногда на многие десятки километров. Если такая пластина пересекается буровой скважиной, то под ней могут быть вскрыты более молодые отложения.

Иногда массивы горных пород оказываются смещенными относительно друг друга в вертикальном направлении. В этом случае обычно они обрамляются прямолинейными уступами в рельефе, которым отвечают сбросы. Нередко блоки смещаются в горизонтальном направлении, то-есть параллельно поверхности Земли. Подобные нарушения называются сдвигами.

Широко известны Талассо-Ферганский сдвиг в Средней Азии и Сан-Андреас в Северной Америке, по которым допускаются перемещения на многие десятки и даже сотни километров.

Изучение разломов имеет важное практическое значение. Разломы сопровождаются зонами повышенной раздробленности пород, а следовательно, и повышенной проницаемости для магматических расплавов и рудоносных растворов. Таким образом они приобретают рудоконцентрирующее значение.

Особенно отчетливо разломы выделяются на космических снимках земной поверхности. Благодаря большой обзорности этих снимков на них видна вся сложная система гигантских трещин, рассекающих земную кору.

В изучение разломов большой вклад внесли советские геологи — А. В. Пейве, В. В. Белоусов, В. Е. Хаин, Н. А. Беляевский, А. И. Суворов, Д. П. Резвой, А. Е. Михайлов, М. В. Гзовский, Е. Е. Милановский и др. Несмотря на большое число исследований, еще многие проблемы, связанные с изучением разломов, остаются нерешенными. Например, одни исследователи полагают, что в земной коре проявлена единая сеть крупных разломов, закономерно ориентированная по отношению к оси вращения Земли. В этом случае образование разломов должно быть определено проявлением напряжений, возникающих при вращении земного шара, иначе говоря, — ротационных сил. Другие исследователи объясняют образование разломов прежде всего перемещениями литосферных плит с образованием трещин растяжения — рифтов — в местах их расхождения, надвигов и шарьяжей — в местах их сближения.

Изучение дна океана позволило выявить в его пределах многочисленные разломы. Океанические разломы явно превосходят континентальные по протяженности. Они прослеживаются на расстоянии 3—4 тыс. км. К ним относятся и рифты вдоль срединно-океанических хребтов, а также поперечные, так называемые «трансформные» разломы.

В земных условиях многие вопросы, связанные с изучением глобального рисунка разломов, решаются с трудом. Во-первых, большая часть поверхности скрыта под водами морей и океанов и пока еще изучена недостаточно. Во-вторых, и на суше значительные пространства покрыты чехлом осадочных пород и поверхностных отложений, скрыты под густой растительностью, где трудно расшифровать структурный рисунок. В этом отношении фотопортреты Луны, Марса, Меркурия выглядят более структурно. На них виден как бы остов горных пород, рассеченный множеством трещин, в том числе и гигантских разломов.

На поверхности Луны трещины впервые были детально изучены по телескопическим и космическим снимкам известным геологом и селенологом А. В. Хабаковым. Трещины довольно густо насыщают лунные континенты. В пределах многих участков разломы образуют сетки северо-восточного и северо-западного направлений. Длина таких линий достигает 100 км. Особенно отчетливо сетка разломов выражена в районе так называемого Центрального перешейка между Морем Дождей и Морем Ясности. Некоторые крупные разломы на поверхности Луны имеют собственные названия. Выделяется, например, разлом Прямая Стена в Море Облаков. Это довольно крутой уступ, наклон которого местами достигает 40° .

Несмотря на огромные успехи последних лет в изучении лунных пород, исследования разломов Луны продвинулись ненамного. Один из небольших разрывов на днище кратера Лемонье, затопленного базальтами, был изучен с помощью «Лунохода-2» в районе зоны сочленения горного массива Тавр и впадины Моря Ясности. Этот разлом протяженностью около 18 км и шириной 0,3—0,5 км назван «Борозда Прямая». Разлом выражен в рельефе в виде прерывистой борозды глубиной до 50—60 м. На склонах борозды развиты глыбовые россыпи.

Лунные разломы выражены трещинами растяжения, иногда сбросами. Несмотря на тщательные исследования, на видимой стороне Луны было отмечено лишь несколько больших сдвигов со смещением до 7—8 км. Снимки Луны особенно благоприятны для обнаружения перемещений по разломам из-за развития множества кратеров. Перемещения легко устанавливаются по нарушениям валов кратеров, пересеченных разломом. Вдоль некоторых разломов прослеживаются длинные узкие гребни, очень напоминающие дайки — пластины магматических пород, выжатые и застывшие вдоль трещин.

По сравнению с лунными континентами на лунных морях разломов гораздо меньше. Однако концентрация разломов отмечается в зонах сочленения континентов и морей. Это вполне закономерно. Достаточно вспомнить Тихоокеанский пояс на Земле со множеством разрывов, с которыми связаны очаги разрушительных землетрясений. Несмотря на слабую в целом сейсмичность Луны, здесь также была отмечена повышенная концентрация эпицентров лунотрясений в зоне перехода между континентальной областью и впадиной Океана Бурь.

Разломы Марса сразу привлекли внимание исследователей. Они оказались очень разнообразными, а по размерам

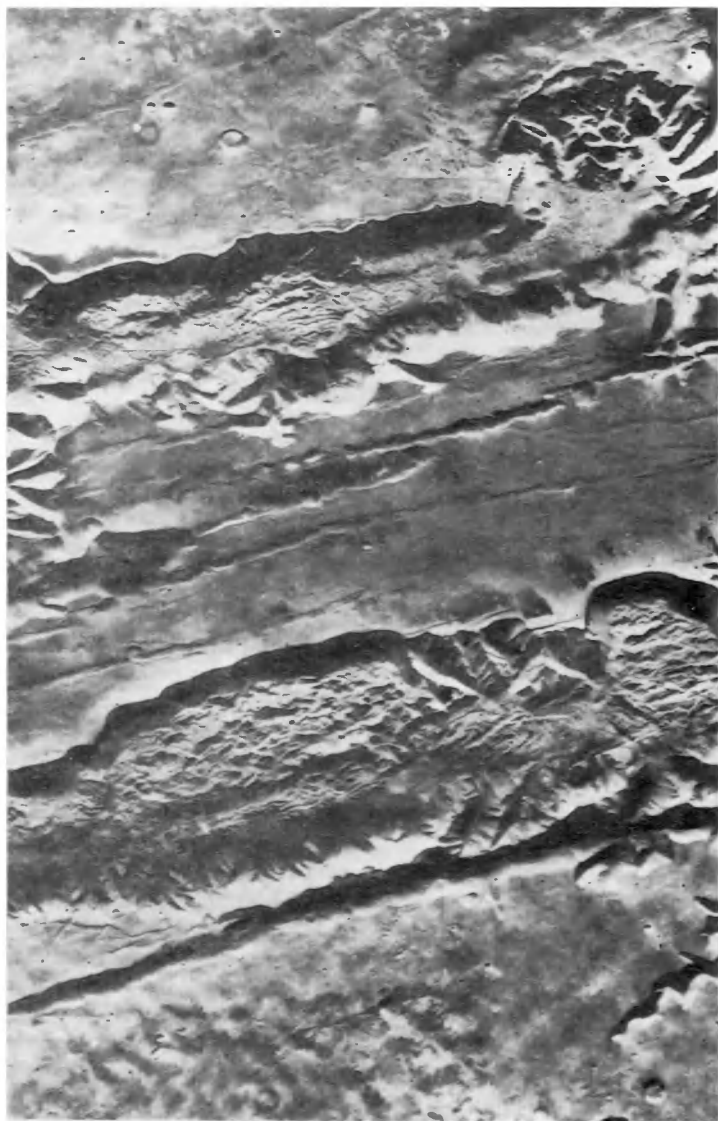
даже превосходящими наиболее протяженные аналогичные структуры земной поверхности.

Особенно выделяется система разломов, получившая название Копрат, позднее переименованная в Долину Маринер. Она протягивается почти на 4000 км. Ширина этой системы разломов достигает 500 км. Она состоит из целого ряда гигантских провалов глубиной в несколько километров и шириной до 100—250 км. На склонах провалов развиты оползни и обвалы. По облику на снимках эта система полностью аналогична рифтовым структурам на Земле. Рифты Земли и Марса оказались настолько похожими, что пока еще никто из исследователей даже не усомнился в общности их происхождения. Рифтовая система Марса располагается на своде и склоне грандиозного поднятия Фарсида, увенчанного гигантскими вулканами. Интересно, что и в земных условиях рифты обычно оказываются приуроченными к сводовым воздыманиям и сопровождаются многочисленными вулканами.

На поднятии Фарсида видно множество радиальных трещин. Отдельные их группы протягиваются на огромные расстояния — до 5000 км. Они имеют формы вееров, так как при удалении от склона поднятия Фарсида густота разрывов резко снижается. На самом поднятии трещины иногда разделены промежутками всего в несколько километров. На Земле нет аналогов такому удивительному сочетанию разрывов, хотя нередко можно наблюдать радиальное расположение разрывов по отношению к сводовым поднятиям.

На снимках Марса привлекают внимание своеобразные структуры — так называемые лабиринты и хаосы. Особо выделяется Лабиринт Ночи, также расположенный на поднятии Фарсида вблизи окончания рифтовой системы. Это участки с повышенной раздробленностью коры. Здесь располагаются многочисленные удлиненные провалы с крутыми склонами. Провалы прямолинейны и в целом образуют сложную мозаику блоков коры. На Земле нет подобных образований, хотя в чем-то на них немного похожи некоторые участки океанического дна со сложным рельефом, например, в проливе Дрейка между Южной Америкой и Антарктидой.

Обширные океанические пространства северного полушария Марса сравнительно слабо затронуты разрывными нарушениями, зато в пределах континентального полушария разрывов очень много. Большинство разломов на континентах Марса имеет незначительную протяженность в пределах первых десятков километров. Но многие разломы группируются в зоны-линеаменты, которые прослеживаются на тысячи кило-



Система гигантских провалов в Долине Маринер на Марсе

Видны оползни и обвалы

метров. В рисунке разломов проявляется вполне отчетливая закономерность. Большинство разломов ориентировано диагонально по отношению к оси вращения планеты.

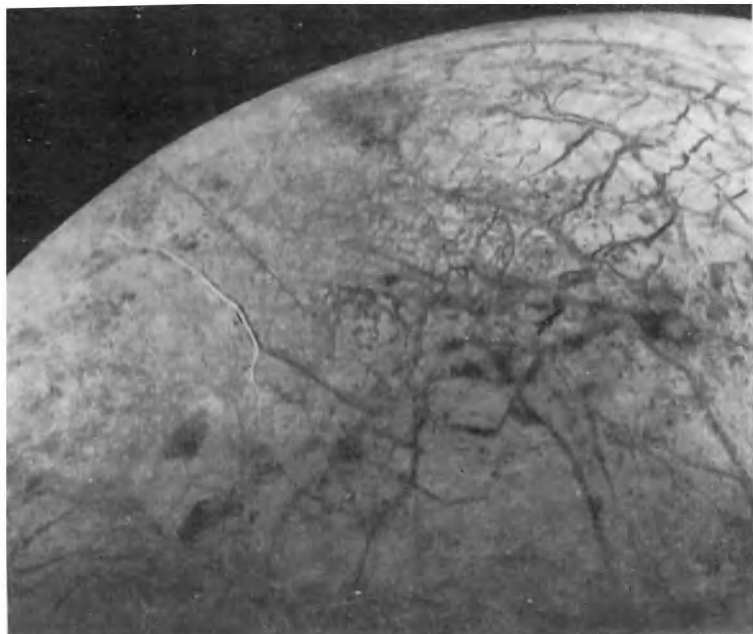
На снимках Меркурия отчетливо выделяются трещины, образованные при растяжении. Особенно много таких трещин во впадине Калорис. Наряду с трещинами растяжения в коре Меркурия проявлены специфические разрывы типа взбросов и надвигов, что совершенно не свойственно Луне, несмотря на всю схожесть фотопортретов этих небесных тел.

На снимках Меркурия внимание исследователей сразу же привлекла система протяженных уступов в виде изогнутых, дуговидных, иногда извилистых линий. Они прослеживаются на десятки и сотни километров. Высота уступов — от нескольких сотен метров до 3 км. Их ограничивают округленные, неровные края, не характерные для нормальных сбросовых уступов Земли и других планет. Иногда уступы переходят в гребни. Можно считать, что уступы и гребни связаны в своем происхождении с короблением коры.

Один из уступов, получивший название Дискавери, прослеживается на 550 км. На снимках отчетливо видно, как по уступу смещаются рассеченные им валы кратеров. У одного из кратеров диаметром 65 км полуокружности, образующие вал, смещены относительно друг друга на 10 км в направлении, перпендикулярном к линии уступа. Такие соотношения можно объяснить только образованием надвига.

Образование системы взбросов на Меркурии связывают с сокращением поверхности планеты. Р. Стром с соавторами подсчитал размеры такого сокращения. По его данным, площадь планеты при образовании взбросов и надвигов сократилась на $6,3 \cdot 10^4$ — $1,3 \cdot 10^5$ км², что равносильно уменьшению радиуса планеты на 1—2 км. Считают, что причина сокращения размеров планеты — фазовый переход части большого металлического ядра из жидкости в твердое состояние, который приводит к уменьшению объема и сжатию силикатной оболочки.

Перейдем теперь к трещинам растяжения. В Море Жары (впадина Калорис) намечается концентрическое расположение зон с трещинами различных размеров. По степени трещиноватости можно приблизительно оценить масштабы расширения этой обширной впадины. В пересчете на всю площадь Моря Жары общая площадь грабенов оказывается вполне сопоставимой с величиной сокращения поверхности в результате формирования системы взбросов и надвигов. Однако в земных условиях при образовании грабенов на долю растяжения по-



Спутник Юпитера — Европа

Отчетливо видна сеть гигантских трещин, заполненных темным материалом

верхности приходится лишь часть площади грабена, точная оценка которой трудно выполнима. Ведь такая трещина не является зияющей, так как она заполнена просевшим блоком коры. Допускается обычно, что истинное расширение поверхности составляет примерно $1/10$ площади грабенов. В этом случае расширение поверхности Меркурия в результате образования трещин растяжения всего 9 тыс. км², что на целый порядок меньше величины сокращения поверхности Меркурия, допускаемой в результате формирования взбросов и надвигов. Следовательно, представления американских исследователей о сокращении поверхности Меркурия могут быть приняты, но с некоторыми ограничениями.

Очень интересно проявление разломов на спутниках Юпитера. На Ганимеде, преимущественно в светлых областях, видны серии узких субпараллельных светлых борозд. Светлые полосы пересекают все формы рельефа, в том числе кратеры. Вероятно, это трещины в ледяном покрове Ганимеда,

образованные в результате тектонических деформаций благодаря проявлению новейшей активности.

На Каллисто выявлены системы концентрических трещин, обрамляющие круговые впадины. Около крупнейшей из них (диаметром 3000 км) прослеживается 20 колец, вторая система диаметром около 1500 км состоит из 15 кольцевых трещин. В случае принятия гипотезы о метеоритно-взрывном происхождении подобных впадин особо следует выделять по генетическому принципу импактный тип разрывных нарушений. Такое предположение подтверждается отсутствием на снимках Каллисто обычных разломов, связанных с внутренней активностью этого спутника.

Обилием разрывных нарушений выделяется спутник Европа. На его светлой поверхности видны многочисленные коричневатые полосы. Они имеют вид трещин, доверху заполненных темным материалом. Протяженность разломов превышает 1000 км. Ширина наиболее крупных трещин достигает 200—300 км. При малой высоте Солнца над горизонтом Европы видна очень сложная сеть трещин и узких гряд, напоминающая участки хаотического рельефа на Марсе. Протяженность гряд около 100 км при ширине 5—10 км. Молодость рельефа Европы указывает на ее современную тектоническую активность. Она объясняется приливным воздействием Юпитера в сочетании с разогревом спутника за счет распада радиоактивных элементов. Предполагается, что по разломам происходит выдавливание глубинного материала, приводящего к постоянному омоложению поверхности Европы.

Отчетливые признаки разрывных нарушений зафиксированы на спутниках Сатурна, которые, судя по малой средней плотности и высокой отражательной способности, сложены в основном льдом или (у наиболее крупных тел) смесью льда и силикатных горных пород. Из-за развития облаков в атмосфере самого крупного спутника Титана нет пока данных о структуре его поверхности. На снимках Реи на фоне множества кратеров вполне определенно дешифрируются спрямленные линии, напоминающие «долины» Луны, протяженностью в десятки и первые сотни километров. На поверхности Дионы отмечены две долины длиной 300 км, которые также можно интерпретировать как разломы. Гигантский разлом зафиксирован на Тефии в виде долины протяженностью около 800 км при ширине 20—60 км. По облику на снимках эта долина выглядит как самый настоящий рифт. При этом светлые полосы на поверхности Дионы и Тефии считаются инеем и рассматриваются в качестве продуктов своеобразного гидровулканизма, связан-

ного с активностью разломов. Четкие разломы видны и на поверхности Мимаса. Это прямые узкие расселины протяженностью 400 и 200 км и шириной всего порядка 5 км.

В последние годы геологи уделяют большое внимание геодинамике, изучающей глубинные тектонические процессы. С геодинамических позиций особый интерес представляет анализ разломов, характерных для всех планет земной группы. Разломы, связанные с условиями растяжения, выражены мировой рифтовой системой на Земле, экваториальной рифтовой системой Марса, тектоническими «долинами» Луны, многочисленными трещинами растяжения в Море Жары на Меркурии. Об условиях сжатия свидетельствуют складчатые пояса Земли с зонами надвигов, а также системы взбросов и небольших надвигов на Меркурии. Сдвиговые деформации допускаются в земной коре, тогда как на других небесных телах отмечены единичные сдвиги с амплитудами всего в несколько километров. На Луне и других планетах нет признаков перемещений литосферных плит, которые допускаются в земных условиях на основе концепций «новой глобальной тектоники».



Что такое реголит и как он образуется?

На Земле главнейшими факторами образования и разрушения пород на поверхности являются атмосфера, гидросфера и биосфера, вследствие чего на ее поверхности образуются мощные толщи осадочных пород, занимающие почти 75% площади. Исследования поверхности небесных тел, не имеющих атмосферы, гидросферы и биосферы, таких как Меркурий, Луна и спутники Марса — Фобос и Деймос, показали, что на них нет осадочного чехла. В то же время их поверхность покрыта слоем своеобразных рыхлых пород, получивших название «реголиты». Их образование происходило и происходит в настоящее время под действием метеоритной бомбардировки, ультрафиолетовых лучей, солнечного ветра и температурного выветривания. Первые три фактора не характерны для Земли, т. е. ее поверхность защищена от их влияния мощным слоем атмосферы. Для небесных тел, не имеющих атмосферы, они являются решающими в преобразовании их поверхности.

Впервые был детально изучен реголит Луны, доставленный в земные лаборатории советскими и американскими космическими аппаратами. Он был отобран преимущественно из морских впадин Луны — моря Изобилия, и лишь два образца взяты из континентальной области. Реголит представляет собой пылевато-песчаный порошок от серого (в континентальной области) до темно-коричневого и черного (в морских областях) цвета, имеющий специфический запах гари и легко формирующийся в отдельные рыхлые комки. Реголит рыхлый; по крайней мере, рыхлым является его верхний слой мощностью до 0,6 м. Об этом свидетельствуют результаты бурения

американскими астронавтами, их непосредственные наблюдения, а также характер следов, оставленных «луноходами» на поверхности Луны. Реголит в основной массе состоит из частиц горных пород, минералов, стекол размером от 1 до 0,5 мм и меньше. Выделяются две разновидности частиц: угловатые и окатанные. Последние носят следы оплавления, спекания и похожи на стеклянные и металлические капли. В составе реголита встречаются зерна следующих минералов: анортита, авгита, ильменита, плагиоклаза, пироксена, оливина, шпинели. Первые три минерала преобладают в составе реголита морских впадин, тогда как в реголите материковой области преобладают плагиоклазы, пироксены и оливин. Частицы металлического железа чаще встречаются в материковом реголите и значительно реже в морском.

Помимо основной тонкообломочной массы в состав реголита входят и крупные обломки размером от нескольких сантиметров до нескольких метров. Они имеют угловатую или округленную форму и неравномерно рассеяны по поверхности; большая их часть углублена в грунт. Обломки представляют собой раздробленные породы, выброшенные из более глубоких слоев в результате ударов метеоритов, а возможно, и вулканические бомбы. Их состав преимущественно базальтовый.

На основании изучения состава реголита, доставленного из различных районов Луны, было определено, что морские впадины сложены базальтовыми породами, а континентальные области — породами, представляющими собой анортозиты. И те, и другие в целом по химическому составу близки к аналогичным земным породам.

Мощность реголита, по-видимому, неодинакова в разных районах и на разных участках. Она зависит главным образом от глубины раздробленности пород метеоритными кратерами и глубины переработки процессами выветривания. По данным станции «Луна-16», мощность реголита в Море Изобилия равна 5,3 м, а в горах у Моря Кризисов, по данным «Луны-20», — 11 м. Однако, возможно, она может быть и больше.

Каким же образом на Луне образуется реголит, как происходит разрушение поверхности?

Наблюдения показывают, что на Луне несомненно происходят процессы разрушения поверхности. На телескопических фотографиях хорошо видно, что древние кольцевые горы резко отличаются по степени сохранности от молодых кратеров. Как разрушаются, каким образом могут перемещать-

ся и где накапливаются продукты разрушения лунных гор?

Разрушение или «выветривание» (пользуясь земным термином) горных пород на Луне должно происходить в результате сильных колебаний температуры в течение лунных суток, метеоритной бомбардировки, воздействия солнечного ветра и, возможно, сейсмических явлений. Не исключено, что в прошлом при значительных масштабах лунного вулканизма большая роль могла принадлежать разрушению горных пород под ударами многочисленных вулканических бомб.

Температурное выветривание на Луне является, по-видимому, существенным фактором в разрушении пород. Суточные колебания температуры, достигающие 300° (от $+125^{\circ}\text{C}$ днем до -175°C ночью), приводят к постепенному растрескиванию и размельчению лунных пород.

Поверхность Луны постоянно подвергается ударам метеоритов различных размеров. Падая на поверхность с космической скоростью ($20\text{--}30\text{ км/с}$), метеориты производят удар, при котором, по данным И. И. Черкасова и В. В. Шварева, выделяется огромная кинетическая энергия, в 3 раза превосходящая энергию, выделяемую, например, при взрыве такого же по массе количества нитроглицерина. В результате постоянной бомбардировки поверхностный слой Луны полностью преобразован: структура его изменена, наблюдается дробление пород, переплавление их, образование конгломератов, частиц, насыщенных примесью метеоритного вещества. Кроме того при метеоритных ударах путем разбрызгивания жидких частиц и их последующего застывания образуется большое количество стеклянных, сферических частиц — шариков. Разрушение поверхностного грунта происходит и под действием микрометеоритов. Так, например, на отдельных зернах реголита Луны зафиксировано до 8 следов удара микрометеоритов.

Луна постоянно подвергается воздействию космического излучения, главным образом солнечного ветра, представляющего собой поток электронов и протонов. Лабораторные исследования показывают, что лунный реголит на глубину до 35 см несет признаки влияния солнечного ветра. В образцах содержится большое количество нейтральных «солнечных» газов — гелия, неона, ксенона, криптона, аргона, водорода. По данным А. П. Виноградова, их концентрация на несколько порядков выше, чем в земных породах и метеоритах. При воздействии солнечного ветра минералы теряют прочность, происходит нарушение их кристаллических решеток, спекание частиц между собой. Однако это ведет не к полному разрушению пород, а лишь частичному «распылению» поверхност-

ных слоев реголита, при котором образуются мельчайшие пылинки лунного вещества.

Для изучения этого явления были проведены опыты, при которых сыпучие среды помещались в разреженной плазме водорода и инертных газов и подвергались бомбардировке пучками ионов. За 120 ч обработки создавался эффект, равный воздействию солнечного ветра в течение 250 млн. лет. Базальтовый порошок образовал корку с изъеденной поверхностью. Стальные шарики становились шероховатыми с поверхности и спекались. Почернение материалов объяснялось их обогащением металлами. Было подсчитано, что за время существования Луны величина разрушения под действием солнечного ветра может достигать 20 м. В этих опытах особый интерес представляет тот факт, что частицы вещества обычно спекались и покрывались коркой с поверхности. Важно также потемнение вещества в результате действия солнечного ветра, так как этим путем можно объяснить темную окраску лунной поверхности.

Роль сейсмических явлений в процессе преобразования лунной поверхности может рассматриваться пока только предположительно. Во всяком случае, на Земле давно установлена тесная связь сейсмичности и вулканизма. Предполагаемые грандиозные вулканические процессы на Луне должны были сопровождаться катастрофическими лунотрясениями. При этом должно было происходить образование трещин, сейсмических срывов и обвалов.

Также неясна пока роль вулканической бомбардировки. Во всяком случае, имеется точка зрения, выдвинутая американским селенологом Дж. Грином, который показал, что наблюдаемые на детальных фотографиях мелкие кратеры вполне могут быть воронками крупных вулканических бомб или целых глыб, выброшенных из жерл лунных вулканов. Отдельные «образования типа камней», попросту говоря, крупные обломки, которые так хорошо видны на панорамах лунной поверхности, переданной на Землю станциями «Луна», также могут оказаться вулканическими бомбами, хотя они и не имеют формы настоящих земных вулканических бомб.

Продукты разрушения горных пород должны несомненно перемещаться вниз по склонам под действием гравитационных сил. А. Т. Базилевский считает, что процесс перемещения рыхлого материала вниз по склону под действием силы тяжести является одним из основных в процессе преобразования лунного реголита. Перемещению лунного грунта по склонам кратеров способствует меньшее, по сравнению с Землей, ускорение

силы тяжести, равное 162 см/с^2 . Оно обуславливает значительную рыхлость и пористость поверхностного слоя, снижает связность его частиц и устойчивость на склонах. Американские астронавты в 1969 г. непосредственно видели оползни на крутых откосах одного из кратеров.

За миллиарды лет существования Луны процессы разрушения горных пород должны были бы дать значительные скопления обломочного материала, но они пока не установлены. По расчетам Т. Голда, на Луне должен быть разрушен слой мощностью до 4 км. По мнению Б. Ю. Левина, лишь метеоритная бомбардировка могла привести к разрушению лунных пород мощностью не менее километра. Куда исчезли продукты разрушения? Может быть, произошло испарение вещества при метеоритных взрывах с последующим частичным рассеянием его в космическом пространстве? Ведь широко распространены представления о том, что в некоторых случаях обломочный материал мог даже достигать поверхности Земли. С другой стороны, не исключено, что рельеф Луны гораздо моложе, чем обычно предполагают, а древние продукты разрушения были вовлечены в результате последующих тектонических движений и вулканизма в сферу переработки эндогенными процессами.

Меркурий по физическим свойствам и внешнему виду очень похож на Луну. Он не имеет атмосферы. Его поверхность также испещрена кратерами и так же, как на Луне, отчетливо выделяются континентальная и морская области. Поверхность Меркурия, по-видимому, повсеместно покрыта темным мелкозернистым материалом, фотометрические свойства которого близки к свойствам лунного реголита. Химический состав этого материала, судя по спектральным данным, полученным «Маринером-10», также похож на состав реголита Луны. Важной составной частью меркурианского материала является субмикроскопическое железо. Происхождение его дискуссионно, но является, по-видимому, результатом процессов изменения вещества под действием солнечного ветра и метеоритных ударов. Помимо этих процессов в преобразовании поверхностного материала большое значение должно иметь температурное выветривание, так как контраст дневных и ночных температур на Меркурии значительно больше, чем на Луне, и достигает 600° (от $+420^\circ\text{C}$ днем до -180°C ночью).

На Марсе очень разреженная атмосфера и криолитосфера, вследствие чего на этой планете могут идти одновременно процессы образования обычных осадочных пород ледникового

и ветрового происхождения и реголита. Пока еще о составе реголита на Марсе можно говорить только предположительно. На снимках поверхности планеты, полученных со спускаемых аппаратов станций, видна каменистая пустыня с отдельными глыбами размером до 0,3—0,5 м и песчаными наносами. Некоторые глыбы обнаруживают пористое или пузырчатое строение, что характерно для земных вулканических лав.

Верхняя часть поверхностного слоя Марса представлена реголитом — раздробленной и измененной различными процессами первичной породой.

По изменениям тепловой энергии марсианского реголита оказалось возможным определить средний размер частиц, составляющих его основную массу. Он колеблется от 1 до 10 мм. В целом породы сильно раздроблены, их плотность равна 0,85—2 г/см³. Напомним, что плотность земных пород от 2,5 до 3,3 г/см³.

Марс издавна был известен своим красным цветом. Предполагается, что реголит Марса состоит из железистых соединений, возникших при разрушении базальта и метеоритного вещества. Это могут быть богатые железом глины или гидраты окислов железа — гётит и лимонит. Кроме железа в составе мелкозернистой части грунта имеются кремний (самый распространенный элемент), кальций, алюминий, магний, сера и титан.

Однако гидраты окиси железа на Земле образуются под действием воды и кислорода. Образование их в условиях Марса, лишенного воды и почти лишенного кислорода, можно объяснить предположением, что раньше в атмосфере Марса были и вода, и кислород, впоследствии улетучившиеся, которые способствовали химическому выветриванию вулканических пород.

В результате ветровой деятельности реголит Марса во многих месторождениях разрушается или засыпается золовой пылью. Отдельные районы Марса, как, например, равнина Большого Сирта, имеющие особенно темный цвет, по-видимому, лишены реголита, так что на поверхности обнажаются черные коренные базальты. Более интенсивно, чем на Луне, идут процессы гравитационного перемещения материала.

Таким образом, по характеру развития поверхностных отложений планеты земной группы делятся на три типа: на которых происходит седиментация (отложение) осадочных пород (Земля), на которых происходит образование реголита (Меркурий, Луна), и промежуточные, к которым относится Марс и, возможно, Венера.



Царство Эола*

Есть ли у Марса атмосфера? Этот вопрос длительное время вызывал споры среди ученых. В начале нашего столетия при изучении Марса в телескоп Г. А. Тихов утверждал, что есть. Это утверждение поддержал американский астроном В. Райт. По его данным, Марс должен быть окружен плотной атмосферой, высота которой достигает 100—150 км. Однако ученые недоумевали: на фотографиях Марса отсутствовали такие признаки атмосферы, как белые облака, и все детали рельефа были видны, как если бы атмосферы не было или она была бы прозрачной. Этот вопрос в какой-то мере разрешился, когда в 30-х годах нашего столетия были получены данные об атмосферном давлении Марса. Оно оказалось равным 8,5 кПа, т. е. в 12 раз меньше, чем на Земле. На самом деле даже эта цифра была завышена почти в 10 раз.

Как показали измерения, произведенные советскими и американскими автоматическими межпланетными станциями, атмосфера Марса чрезвычайно разрежена, и среднее значение давления у поверхности равно 610 Па; на Земле такое давление отмечается на высоте 30 км. Разреженностью атмосферы и объясняется хорошая видимость поверхности Марса на фотографиях. Но даже наличие такой атмосферы имеет важное значение для планеты, так как защищает ее поверхность от метеоритов, хотя и очень малых (менее 1 см в диаметре), которые испаряются, не долетая до нее. На Луне же и такой атмосферы нет, поэтому ее поверхность испещрена и большими и очень мелкими кратерами.

* В древнегреческой мифологии Эол — повелитель ветров.

В 40-х годах с применением инфракрасного спектрометра стало возможным изучить состав атмосферы Марса. Сначала удалось определить присутствие углекислого газа, причем в значительно больших количествах, чем предполагалось ранее. Затем было установлено присутствие ничтожного количества кислорода и водяных паров. В результате измерений, произведенных непосредственно на поверхности Марса приборами станций обнаружено, что углекислый газ составляет 95% всей атмосферы, азот 2—3% и аргон 1—2%. Такие важные и необходимые для жизни элементы как кислород и вода присутствуют в долях процента: кислорода 0,3%, а водяных паров и того меньше.

Как возникла атмосфера Марса? Так же, как и на Земле — в результате дегазации — выхода газов из недр планеты. Однако сила тяжести на Марсе значительно меньше, чем на Земле, поэтому большая часть газов улетучивается в мировое пространство, и лишь незначительная их часть способна удержаться вокруг планеты.

Несмотря на разреженную атмосферу и низкое давление, на Марсе существуют ветры и даже очень сильные, сильнее, чем на Земле. Для возникновения ветров необходимо несколько условий: суточное и сезонное изменения температуры и контрастность рельефа. Температурные различия на Марсе большие. В летнее дневное время на экваторе поверхность нагревается до $+25^{\circ}\text{C}$, а ночью остывает до -80°C . На полюсах температура практически и летом и зимой остается отрицательной, поэтому движение ветров на Марсе большей частью направлено от полюсов к экваториальным областям, причем, как и на Земле, из зимнего полушария в летнее.

Что касается рельефа, то на Марсе он даже контрастнее, чем на Земле, и определить это помогло давление атмосферы. Известно, что с высотой местности давление изменяется: чем выше рельеф, тем оно меньше, и наоборот. Приняв, что среднее давление в $6,1 \cdot 10^2$ Па характерно для местности с условной нулевой отметкой, получили, что наивысшие значения давления характерны для участков с высотой 3—4 км, а наименьшие — для высокоподнятых точек рельефа — в 27 км. Таким образом, общий контраст рельефа на Марсе достигает 30—31 км, тогда как на Земле он равен 20—21 км. На Марсе существуют возвышенности и низменные равнины, горные массивы, вулканы, вулканические плато и многочисленные кольцевые структуры.

Еще при телескопическом изучении на Марсе были установлены пыльные бури. В 1971 г. сильная буря разразилась в

конце сентября и продолжалась несколько месяцев, как раз в то время, когда советские и американские автоматические станции подлетали к Марсу. Новая сильная пыльная буря 1973 г. вновь скрыла южную половину планеты. Сильные бури на Марсе не такое уж редкое явление. Менее значительные циклоны и антициклоны возникают очень часто, как в северном, так и в южном полушариях почти во все времена года. Средняя скорость ветров на Марсе составляет 50 м/с, а максимальная превышает 100 м/с. При такой скорости ветры увлекают поверхностные частицы почти в 5 раз тяжелее, чем на Земле, и переносят их на значительные расстояния.

С получением первых космических изображений Марса исследователи обратили внимание на гигантские светлые и темные полосы, широко развитые в различных районах Марса. Особенностью этих полос является то, что они располагаются за кратерами, вследствие чего их называют кратерными шлейфами.

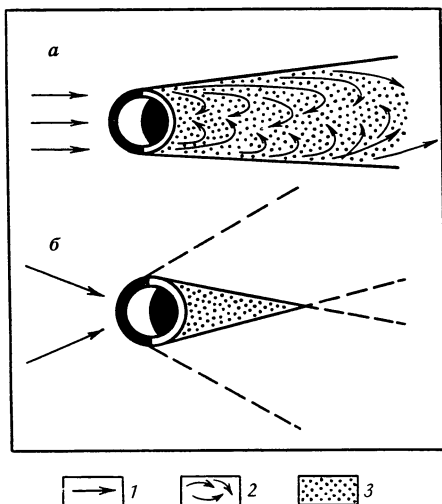
Детальное рассмотрение полос показывает, что форма их неодинаковая. Одни полосы похожи на сигары, другие — на хвосты комет, третьи имеют более расплывчатые очертания. Длина отдельных полос достигает 50 км и более, а ширина 5—10 км.

Что полосы как-то связаны с ветром, ни у кого не вызывало сомнений. Но было совершенно непонятно, почему одни полосы имеют черный цвет, а другие — белый. Делалось много предположений. Считали, что цвет связан с окраской переносимой пыли, или, наоборот, с коренными породами, обнажающимися после того как с них удалена пыль. Американские исследователи пробовали в лабораторных условиях получать такие формы и в результате пришли к выводу, что светлые формы являются аккумулятивными образованиями, а темные — дефляционными (формами выдувания), и темный цвет определяется коренными породами.

Аналоги этих форм нашлись и на Земле. Ими оказались песчаные дюны ветровой тени. В земных пустынях ветры, несущие большое количество песка и пыли, встречая на своем пути препятствия и огибая их, за препятствиями, т. е. в «тени» их, откладывают несомый материал, образуя вытянутые вдоль ветра песчаные валы. Правда, они не имеют таких громадных размеров, как на Марсе. Их длина достигает нескольких километров, ширина 100—150 м, а высота 15—20 м. Гигантские размеры марсианских форм можно объяснить и необычно высокими скоростями ветров, и большими размерами препятствий — кратеров.

Форма кратерных шлейфов (а, б) в зависимости от направления ветропесчаного потока. По Р. О. Кузьмину [1978 г.]

- 1 — направление ветропесчаного потока;
2 — зона турбулентности;
3 — зона золотой аккумуляции



Изучая кратерные шлейфы, Р. О. Кузьмин объяснил различную их форму действием ветров разных направлений. При этом различный цвет кратерных шлейфов зависит от неодинакового угла освещения Солнцем. Близкие по морфологии формы, сфотографированные при разных углах освещения, имеют то светлый, то темный цвет.

На Земле, пожалуй, самой типичной формой накопления песчаного материала являются дюны и барханы. А есть ли они на Марсе? Первые фотографии марсианской поверхности, сделанные «Марсами» и «Маринерами», не могли ответить на этот вопрос. И только лишь на нескольких фотографиях удалось увидеть формы, напоминающие земные дюны. На мелкомасштабных снимках это было обычное темное пятно на дне кратера Проктор. На снимках более крупного масштаба оказалось, что это темное пятно представляет собой большое (60×30 км) поле развития гряд, вытянутых параллельно друг другу в одном направлении. Американские исследователи Д. Катс и Р. Смит, описавшие эти формы, уже уверенно говорили о том, что это дюнные гряды и сложены они, по всей вероятности, песком. В связи с этим можно предполагать, что многие темные пятна на дне других кратеров также могут быть дюнами.

На снимках, переданных с поверхности Марса автоматическими станциями было обнаружено большое количество

эоловых форм. На месте посадки станций удалось подсчитать, что отдельные дюны и барханы имеют высоту 15 м, крутизну склонов около 30° и отстоят друг от друга на 100 м. Поскольку место посадки расположено на океанической равнине, можно предполагать, что эоловый рельеф вообще характерен для этих обширных областей Марса, что отчасти подтверждается их светлым цветом на мелкомасштабных изображениях.

Особенно широкое развитие эоловых форм представилось возможным обнаружить на снимках в северном полярном районе. Здесь поля дюн и барханов тянутся на сотни километров. Выделяются продольные и поперечные к направлению ветра барханные и дюнные гряды. Многие из них сложены в основном снегом.

Барханы и поперечные дюнные гряды развиты в устье Северного каньона и в других долинах. Их положение свидетельствует о том, что они образованы сильными ветрами, нисходящими вдоль этих долин. По периферии полярной шапки расположение и ориентировка дюн говорят, что здесь ветры направлены против часовой стрелки. Таким образом, существующая атмосферная циркуляция на полярных шапках Марса, хотя и является сложной, но в целом аналогична циркуляции в Антарктиде.

Интересную точку зрения недавно высказали американские ученые Дж. Мак-Коли и К. Брид. Они считают, что марсианские дюны в настоящее время малоактивны. Дюны образовались значительно раньше, когда на Марсе была плотная атмосфера, ветровой режим был динамичнее. Поразительное сходство марсианских дюнных и барханных гряд с эоловыми формами пустыни Сахара, возраст которой около 10 тыс. лет, позволило этим исследователям предположить, что на обеих планетах были одинаковые условия для отложения песка ветром, что важно для понимания глобальных закономерностей развития планет.

Приэкваториальная территория Марса является ареной действия ветров различных направлений. Это настоящее царство Эола, деятельность которого проявляется на самых низких и самых высоких участках поверхности. Многочисленные формы рельефа, ориентированные согласно ветровым потокам, являются хорошими индикаторами направлений ветров. По ним можно восстановить преобладающие направления ветров, дующих на этой планете.

Северные ветры несколькими потоками устремляются на юг. Один из них ориентирован почти в меридиональном

направлении и разделяется на три ветви — восточную, западную и центральную.

Южные потоки воздушных масс по ориентировке эоловых форм выражены менее отчетливо, чем северные; по-видимому, это объясняется тем, что рельеф южного полушария Марса более сложный. Здесь нет обширных выровненных пространств, где хорошо были бы выражены гряды или шлейфы. Многочисленные кратеры заставляют ветры обтекать их и таким образом искажать их основные направления.

Горный массив Фарсида является мощным барьером на пути северных и южных ветров, которые плавно его огибают. На склонах массива и склонах вулканов выражены радикальные направления нисходящих потоков воздуха. У подножия склонов Фарсиды происходит встреча разнонаправленных ветровых потоков — нисходящих и северных, в результате чего происходит аккумуляция эолового материала. Об этом свидетельствует всхолмленный рельеф, по-видимому, представляющий собой скопления дюн или барханов. Аккумуляция усиливается вследствие торможения воздушного потока перед орографическими препятствиями. На Земле в подобных условиях образуются обширные равнины навевания, как, например, перед Копетдагом в Туркмении.

При тех больших скоростях, которые имеют ветры на Марсе, они могут производить не только аккумулятивную, но и дефляционную работу. Она заключается в механическом разрушении пород, развевании и выдувании частиц.

Дефляция усиливается там, где тектоническая трещиноватость совпадает с преобладающими направлениями ветров. Такие трещины на Марсе, как Темпе, Тантала, Мареоты, отпарированы — очищены ветром.

Под действием дефляции не только преобразуется уже существующий рельеф, но возникают и новые формы. К ним относятся ярданги — линейные борозды выдувания, разделенные гребнями, нередко заостренными. На Земле эти формы широко развиты в пустынях. Глубина борозд достигает нескольких метров. Ярданги встречаются группами и всегда ориентированы в направлении господствующих ветров. На Марсе формы, напоминающие ярданги, обнаружены на возвышенности Фарсида, на равнине Амазония, Эолия и в южном полярном районе. Они намного превышают по размерам земные формы. Их длина достигает 50 км и более, ширина до 1 км, а глубина до 20 м.

Кроме ярдангов, на Марсе имеется большое количество замкнутых котловин и впадин, образование которых также свя-

зывается с глубинной дефляцией. Р. О. Кузьмин, К. П. Флоренский и А. Т. Базилевский обнаружили их на снимках «Марса-5» к северу и востоку от равнины Аргир. В южном приполярном районе развит «ямчатый» рельеф — скопление различных по форме и размерам впадин (от 0,5 до нескольких километров в диаметре и глубиной до 400 м). Его образование в данное время может быть объяснено только дефляцией.

Глубинная дефляция на Земле имеет громадные масштабы. Примерами служат впадина Каттара в Африке размером 20—25 км в поперечнике и относительной глубиной 200 м, Турфанская впадина в Центральной Азии, расположенная на 150 м ниже уровня океана. В их пределах существуют восходящие и нисходящие турбулентные потоки воздуха, производящие как бы сверлящее действие и выносящие мелкоземистый материал вверх.

В марсианских кольцевых впадинах Аргир и Эллада также происходит дефляция. Подтверждением этого являются тучи пыли, поднимающиеся над Элладой во время глобальных бурь на высоту более 30 км. Процесс оседания пыли идет очень медленно. Во время ее осаждения формы рельефа на дне Эллады не просматривались, поэтому на некоторых снимках поверхность Эллады выглядела ровной и светлой. На других же снимках, сделанных после окончания пыльной бури, детали рельефа в виде гряд и кратеров стали видны отчетливее.

Если на Марсе, так же как на Земле, в изобилии проявлены следы деятельности ветра, то у большинства небесных тел атмосфера практически отсутствует и не играет роли в преобразовании поверхности. Однако, несмотря на это, похожие на золотые формы можно встретить и на телах, не имеющих атмосферы. Так, на Деймосе, небольшом спутнике Марса, за некоторыми кратерами наблюдаются светлые полосы — шлейфы, аналогичные марсианским дюнам ветровой тени.

Предполагается, что сильные циклонические ветры могут проявляться в атмосфере Венеры. В полярных и экваториальных ее районах структура облаков похожа на вихревую. Об эоловой деятельности на поверхности планеты свидетельствуют формы ячеистого выветривания на выступах горных пород, которые были зафиксированы на снимках со спускаемых аппаратов.

Плотной атмосферой обладает также крупнейший спутник Сатурна — Титан, однако о процессах, происходящих на его поверхности, пока можно строить только догадки.



Текли ли реки на Марсе?

На космических изображениях Марса, полученных с автоматических межпланетных станций «Марс-4», «Марс-5» и других, внимание исследователей привлекли формы рельефа, напоминающие земные речные долины. Ведь реки, вода — это возможная жизнь, если не сейчас, то в прошлом. Действительно ли это речные долины или формы рельефа, только похожие на них? Если это речные долины — когда они образовались, куда девалась вода, и была ли она вообще? А не могла ли вместо воды быть другая жидкость? На эти вопросы можно попытаться ответить, если детально изучить эти формы, насколько позволяют возможности космических снимков.

Прежде всего посмотрим, где развиты эти долины, каково их географическое положение. Долинные формы приурочены к приэкваториальной зоне и не встречаются севернее и южнее 40° . Почему эти параллели служат своего рода границами развития долин? По-видимому, одной из главных причин являются климатические условия, благоприятные здесь для существования воды в прошлом. В настоящее время вода на Марсе не может находиться в жидком виде: из-за низких температур и давления она замерзает и испаряется. С другой стороны, севернее 40° с. ш. располагаются обширные океанические равнины Марса, которые, по аналогии с Землей, являются местом, куда долины впадают или, лучше сказать, в которые они открываются.

Среди долин Марса наблюдаются как крупные, так и мелкие. Самые крупные долины — Касэй, Арес, Тиу и Залбатану — достигают 1000 км в длину и 100 км в ширину, причем ширина их увеличивается от верховий к низовьям. Менее круп-

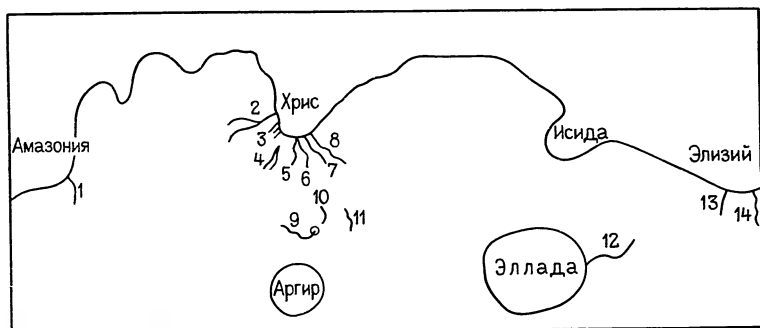
ные долины — Самара, Локра, Клота, Ладон, Мангала и многие другие — имеют 100—300 км в длину и ширину от 1 до 10 км.

Как и земные, марсианские долины имеют значительные уклоны русел. Их верховья расположены выше низовьев на 1—2 км, а иногда и на 4 км. Большая часть крупных долин ориентирована меридионально, и лишь Нергал и Нанеди имеют широтную ориентировку. Начинаются долины чаще всего в кратерированной местности, пересекают кратеры или прорезают возвышенности — кордильеры, как, например, Долина Маджа и другие, расположенные южнее Касэй. Долина Мангала берет начало или в озере (безводном в настоящее время), или на лавовом плато. Самые большие долины — Тиу, Арес, Залбатану, Симуд — берут начало в пределах полигонально-блокового, или «хаотического» рельефа.

Многие крупные долины открываются на океанические равнины — Хриса (Тиу, Арес и др.), Элизий (Аль-Кахир и Маадим), Амазония (Мангала). Исключение составляют долины Реулл, «впадающая» в бассейн Элладу, и Нергал — в кратер Холден. В устьях небольших долин, впадающих в бассейн Хриса, видны конусы выноса, как и у земных рек.

Все долины в настоящее время сухие. Их дно плоское, на мелкомасштабных снимках оно выглядит гладким. В Долине Касэй на широком плоском дне выделяются светлые русла, слегка изгибающиеся и меандрирующие. Очень интересна в этом отношении Долина Мангала. На ее дне на снимках крупного масштаба видны формы, характерные для земных речных долин: разветвленные русла, острова, протоки, прирусловые отмели, валы (бары), описанные Д. Мильтоном. Острова наблюдаются во многих долинах, особенно в приустьевых частях Арес, Тиу, Касэй и др. Но скорее всего это не аккумулятивные формы, а останцы коренных пород, так как на многих из них сохранились кратеры — так же, как и на окружающих поверхностях. Из других эрозионных форм на дне долин встречаются воронки, ступени или сухие водопады, имеющие зубчатые края и форму подковы. Кроме речных форм встречаются дюны, образованные ветром.

Склоны долин в большинстве случаев крутые и высокие. По мнению Р. Шарпа и М. Малина, их высота достигает 0,5—3 км. В основании склонов часто лежат обвальные и оползневые массы, сорвавшиеся с их верхних частей, где сохранились циркообразные ниши отрыва. Типичные террасы отсутствуют, но склоны некоторых долин имеют ступенчатое строение, по-видимому, из-за того что в обрывах обнажается слоистая толща. В долинах Мангала, Ведра, Моми на отдельных участ-



Долины Марса

1 — Мангала; 2 — Косэй, 3 — комплекс долин Бахрам, Ведра, Мами, Маджа; 4 — Нажди; 5 — Залбатану; 6 — Симуд; 7 — Тиу; 8 — Арес; 9 — Нергал; 10 — Ладон; 11 — Самара, 12 — Реулл; 13 — Аль-Кахира; 14 — Маадим. Внизу — Долина Бахрам, врезанная в склон Лунного плато

ках наблюдается как бы срезание основным руслом второстепенных. Это может свидетельствовать о двух этапах формирования долин. Были ли они разделены каким-то промежуток времени — сказать трудно.

Кроме форм, сходных с речными долинами, наблюдаются типичные овраги, развитые преимущественно на склонах рифтовой Долины Маринер. По своим размерам они не уступа-



Формы рельефа, напоминающие земные овраги, широко развиты на склонах тектонической Долины Маринер

Наблюдается закономерная северо-западная и северо-восточная ориентировка «оврагов», связанная с приуроченностью их к тектоническим трещинам, по своим размерам «овраги» Марса намного превышают земные

ют некоторым «речным долинам» Марса и намного превышают земные овраги. Достаточно сказать, что наиболее крупная разветвленная овражная система на южном склоне Долины Маринер ненамного меньше Большого Каньона Аризона в Северной Америке. Менее крупные овраги, пересекающие склоны Долины Маринер, похожи на обычные эрозионные сухие рывины — саи, широко развитые в аридных областях Земли.

Разветвленная овражная сеть хорошо видна на снимках плато Альба, находящегося на северной окраине континентальной области. Она очень похожа на эрозионную сеть Исландии, прорезающую базальтовые покровы. Там тоже многие долины сухие, из-за того что атмосферные осадки просачиваются сквозь пористые базальты, не задерживаясь на поверхности.

Для долин Марса, в том числе и оврагов, характерны прямолинейность отдельных отрезков и закономерно повторяющаяся ориентировка последних на всем протяжении. Это свидетельствует о приуроченности их к тектоническим трещинам.

Самая крупная Долина Касэй является рифтом. Об этом свидетельствуют ее громадная ширина (300—400 км, что вряд

ли может быть объяснено только эрозией), зияющие трещины, параллельные долине, обвалы на склонах.

Весь облик долин Марса и их внутреннее строение говорят о том, что они были образованы водой. Только под действием воды могли сформироваться ветвящиеся русла, прирусловые отмели и валы. Пробовали сравнивать марсианские долины с лунными эрозионными формами, образованными текущей горячей лавой, — но общего не нашли. Лавовые потоки образуют русла преимущественно одиночные, не ветвящиеся, с неровным дном. Они могут заканчиваться внезапно, слепо.

Ученые также отбросили и предположение, что долинные формы могли быть образованы какой-либо другой жидкостью, например типа нефти или жидкой углекислоты. Предположение о том, что долины сформировались ветром, т. е. являются формами выдувания, хотя и приуроченными к тектоническим трещинам, также не может быть принято, так как не объясняет всю сложность их строения и главным образом наличие аккумулятивных речных форм. Однако ветер, по-видимому, играл немалую роль в последующей препарировке, т. е. очистке долин.

Несмотря на сходство марсианских долин с земными, у них есть и целый ряд различий. Во-первых, если их длина соизмерима с длиной земных рек, то ширина их значительно больше. Во-вторых, отсутствие террас свидетельствует о том, что марсианские долины, по-видимому, сформировались без влияния тектоники. Кроме того при детальном исследовании марсианских форм выявляется, что угол впадения притоков в главную долину на Марсе меньше, чем у земных рек, что притоки более врезаны, чем основная долина, в которую они впадают, извилистость марсианских долин меньше земных, а острова более вытянутые. По-видимому, дальнейшее изучение марсианских форм даст еще более интересные данные об их строении, пока же приходится использовать то, что уже известно.

Наилучшим образом строение крупных марсианских долин объясняется, если принять, что они образовались внезапно, катастрофически, при прохождении большого количества воды. Это объяснило бы и большую ширину долин, и преобладающую их прямолинейность, и отсутствие террас. По мнению Дж. Мак-Коли, М. Карра, Д. Мильтона, В. Бекера и других ученых, сток воды в марсианских реках должен был быть намного больше, чем могла бы дать плотная земная атмосфера.

На Земле имеется пример такого внезапного катастрофи-

ческого прохождения воды и образования многочисленных эрозионных форм. Это Спокайн-поток в штате Вашингтон в Северной Америке. Он образовался 18—20 тыс. лет назад вследствие прорыва озера Миссаула, подпруженного ледником. Сток воды, вероятно, продолжался от двух дней до двух недель и, как предлагал Д. Бретц, по объему в 10 раз превышал расход всех рек Земли. В результате возникла своеобразная выровненная базальтовая поверхность — скебленд, прорезанная глубокими разветвленными, в настоящее время сухими руслами-каналами, почти лишенная отложений, с отдельными песчаными барами и эрозионными уступами-водопадами. Сравнение марсианских эрозионных форм и форм скебленда показало на их большое сходство, хотя отмечаются и некоторые различия в длине и ширине отдельных форм.

Если принять гипотезу катастрофического образования долин, то возникает вопрос, откуда взялось такое громадное количество воды? Самые крупные марсианские долины берут начало в полигонально-блоковом, или «хаотическом» рельефе, образование которого связано с таянием мерзлоты. Поэтому основным источником образования марсианских долин могла быть мерзлота, при быстром таянии которой выделилось огромное количество воды. Вследствие этого Р. Шарп и М. Мэлин называют долины, образовавшиеся в этом районе, выпускными каналами.

Отчего произошло таяние мерзлоты? Причинами могли служить или резкое потепление климата, или излияние магматических расплавов на поверхность в виде вулканической лавы. В настоящее время это одно из самых убедительных объяснений происхождения громадного объема воды. Формирование более мелких дендритовидных долин и оврагов также может быть результатом таяния льда.

Как указывалось выше, для марсианских долин характерна значительная глубина 1—2 км. По мнению американских исследователей Д. Вэллиса, К. Сагана, В. Бекера, углубление русел происходило следующим образом: вода могла течь под слоем льда, образовавшимся вследствие того что замерзание воды на поверхности могло происходить быстрее, чем ее испарение. В результате этого под ледяным панцирем испытывающая высокое давление вода могла интенсивно углублять русло. Вообще ледовым процессам, в частности эрозии под действием льда, создающего заторы, в настоящее время придается большое значение не только в углублении марсианских русел, но и в их расширении. При этом предполагается, что имел место еще один специфический процесс — кавита-

ция, заключающийся в разрушении пород под действием лопающихся пузырьков газа, выделяющихся из воды в поверхностных условиях. На Марсе этот процесс может иметь более существенное значение вследствие более низких значений гравитации и атмосферного давления. Таким образом, большое количество воды, большая скорость потоков и, по-видимому, их высокая турбулентность в сочетании с ледовой эрозией и кавитацией могли привести к образованию глубоких и широких марсианских долин.

На вопрос о том, когда сформировались марсианские долины, т. е. когда текли реки на Марсе, точный ответ дать трудно. Ясно, что они моложе кратерированных равнин, в которые они врезаны. Поскольку многие из них открываются на океанические равнины и конусы выноса наложены на океанические лавы, следовательно, долины моложе последних. Возраст океанических равнин и слагающих их пород определен в 1,5—0,7 млн. лет. Эта цифра может служить нижним возрастным пределом долин.

В этой главе мы рассказали о речных долинах и оврагах Марса. Некоторые сведения о земных реках привлекались только в целях сравнения. Текли ли реки на других планетах? На этот вопрос пока можно ответить отрицательно, так как на имеющихся снимках не обнаружено каких-либо признаков деятельности текучих вод ни сейчас, ни в прошлом.



Тайны марсианских каналов

С начала телескопического периода в истории астрономии Марс представлял собой один из самых интересных небесных объектов. Его изучали известные астрономы Г. Галилей, Х. Гюйгенс, Д. Кассини, В. Гершель и многие другие. На поверхности Марса были открыты темные и светлые пятна, которые предположительно считались морями и сушей. Несколько позднее были открыты полярные шапки Марса. В 1877 г. в особенно благоприятных для наблюдения условиях — во время противостояния Марса, когда он находился на ближайшем расстоянии от Земли (около 56 млн. км), итальянский астроном Дж. Скиапарелли открыл темные полосы, которые пересекали сушу и как бы соединяли различные моря. Он нанес на карту около 100 таких полос и назвал их каналами (природного или искусственного происхождения). Прямолинейность полос, их несоответствие извилистым земным рекам позволили Скиапарелли сделать вывод, что каналы представляют собой борозды или углубления природного образования, служащие для протока воды. Каналы не оставались неизменными, они расширялись, сужались, раздваивались и вновь соединялись. Все эти особенности каналов он объяснял сезонными климатическими изменениями, приводившими к таянию снега и увеличению или уменьшению стока воды.

Геометрически правильный рисунок каналов, нарисованный Скиапарелли, побудил многих исследователей считать их делом рук разумных существ. Сам же Скиапарелли не утверждал это, но и не выступал с критикой этого предположения.

Гипотезу об искусственном происхождении каналов поддер-

живал и развивал американский астроном П. Лоуэл. Он увеличил на своей карте количество каналов до 600 и считал, что они представляют собой громадные протоки, по которым тающие воды от полюсов переносятся на всю остальную поверхность Марса. Это — «искусственное произведение разума», созданное для сохранения жизни в марсианских пустынях, теряющих воду. Каналы сливаются в озера или «оазисы», где находятся плодородные земли.

Однако другие исследователи Марса — Э. Барнард и Э. Антониади — не видели четко проведенной сети каналов или видели их не столь прямыми и резкими, а размытыми, состоящими из отдельных, иногда округлых темных и светлых деталей. С тех пор вопрос о существовании каналов оставался предметом острых дискуссий. Против искусственного происхождения каналов говорили и такие аргументы, как физические свойства Марса, неблагоприятные для жизни, — разреженная атмосфера с почти полным отсутствием кислорода и водяных паров, постоянные низкие температуры. А после того как было определено давление у поверхности Марса, оказавшееся очень низким, стало ясно, что вода в жидком виде существовать на поверхности Марса длительное время не может. Таким образом, предположение об искусственном создании каналов и их заполненности водой в настоящее время является несостоятельным. Тем не менее вопрос о природе каналов Марса остается нерешенным. Если это не искусственно созданные объекты, тогда что это такое?

Предположение о том, что каналы могут представлять собой трещины или уступы тектонического происхождения, высказывалось с первых шагов их изучения. В 1959 г. советские исследователи Г. Н. Каттерфельд, а затем и Г. В. Чарушин отметили закономерную ориентировку каналов, выделив несколько систем их простираения. Позднее они провели сопоставление марсианских каналов с глубинными разломами Земли и нашли между ними много общих черт. Так же, как и у глубинных разломов Земли, на Марсе было выделено четыре основных направления каналов: субширотное, субмеридиональное, северо-восточное и северо-западное. Основная часть каналов на Марсе, так же как и разломов на Земле, приходится на континентальные, в том числе экваториальные области. Таким образом, авторы считают, что каналы Марса — это тектонические долины, возникающие вдоль глубинных разломов, выходящих на поверхность планеты. Наибольшая длина этих форм на Марсе достигает 5 000 км, что сопоставимо с крупными линейными зонами разломов Земли.

Американские исследователи более широко используют термин «каналы» для описания разнообразных поверхностных углублений, включая в него и линейные формы, и извилистые. По существу, они не отделяют каналы, выявленные при первых телескопических исследованиях Марса, от совершенно новых объектов — долин, впервые увиденных на космических изображениях планеты. Большинство этих долин из-за своего небольшого размера не были раньше видны в телескоп. Поэтому каналы, по данным американских исследователей, могут иметь и экзогенное происхождение (например, речные долины), и эндогенное (трещины, лавовые потоковые формы и т. д.).

К. Саган и П. Фокс, основываясь на анализе космических снимков, критически рассматривают каналы, выделенные при телескопических наблюдениях Э. Антониади и Э. Слайфером, и практически полностью отрицают их существование. Они предположили, что вообще каналы в понимании этих исследователей сомнительны и являются результатом неверного зрительного восприятия деталей поверхности при плохих астрономических условиях наблюдения. Попытки сравнить отдельные участки карт с каналами и темными деталями на схемах Дж. Скиапарелли, Э. Слайфера и Э. Антониади с фотографиями, полученными со станций, ничего не дали: каналов, как их изображали указанные ученые, на космических изображениях нет.

По-другому подошел к оценке соответствия каналов и объектов на космических снимках советский исследователь Г. А. Бурба. Он считает, что «эффект каналов Марса», выделенных с Земли при телескопических наблюдениях, представляет собой такое же явление, которое наблюдается при фотографировании Земли из космоса: на мелкомасштабных космических снимках Земли отдельные формы структуры и рельефа не распознаются, концентрируясь в линейные зоны — линеаменты. На крупномасштабных снимках наблюдается обратная картина: протяженные линеаментные зоны теряют свою целостность, распадаясь на ряд отдельных форм.

Г. А. Бурба сопоставил каналы на карте Э. Слайфера с распределением кратеров диаметром более 10 км и линейных элементов рельефа в районе Эритрейского моря на космических изображениях, полученных автоматическими станциями «Марс-4» и «Марс-5». Выявилась хорошая сходимость между всеми тремя элементами, т. е. линии каналов совпадают со скоплениями кратеров или зонами тектонических нарушений. Места пересечения каналов, так называемые «оазисы», совпали с участками наибольшей плотности кратеров или разрыв-

ных нарушений. Некоторые каналы в районе Тавмасия — Эритрейского моря достаточно хорошо совпадают с границами относительно приподнятых и опущенных участков, являясь, таким образом, границами блоков коры.

Кроме перечисленных представлений, на природу марсианских каналов существуют другие точки зрения. Предполагается, что часть каналов совпадает с цепочками крупных кратеров, или кратерными лучами, как на Луне, или с формами, образованными аккумуляцией и дефляцией под действием ветра, в том числе с громадными протяженными песчаными дюнами.

Заканчивая рассмотрение вопроса о марсианских каналах, можно определенно утверждать, что представление об их искусственном происхождении следует считать нереальным. В то же время какой-либо единой формы на поверхности, которая точно соответствовала бы каналам, выделенным ранее при наблюдении их в телескоп, на космических изображениях поверхности Марса не обнаружено. Многие каналы могут быть сопоставлены с линиями тектонических нарушений или приближены к ним, так как часто они не совпадают территориально, а идут параллельно друг другу. Некоторые каналы приблизительно могут быть отождествлены с крупными долинами, для которых предполагается флювиальный генезис. Это относится, в частности, к долинам Арес и Тиу. Наблюдается приуроченность каналов к границам областей с контрастной цветовой характеристикой и различным гипсометрическим положением. Убедителен и довод о том, что с Земли каналами кажутся линейные зоны скопления кратеров и другие элементы рельефа.

Таким образом, каналы — эти интересные и загадочные формы марсианской поверхности, так волновавшие многих исследователей, с развитием космической техники получили свое научное объяснение.



Замерзшие планеты

Планеты находятся на разном расстоянии от Солнца, поэтому они получают от него неодинаковое количество тепла. Меркурий и Венера — самые близкие к Солнцу планеты и самые теплые.

Так, на Меркурии в дневные часы температура поднимается до $+20^{\circ}\text{C}$, а на Венере до $+500^{\circ}\text{C}$. Большое влияние на изменение температуры планет оказывает атмосфера. Меркурий находится ближе к Солнцу, чем Венера, однако из-за отсутствия атмосферы в ночное время он охлаждается до -180°C . Венера же, окруженная плотными облаками, имеет положительные температуры поверхности.

Все тепло, получаемое Землей от Солнца, из-за наклона оси планеты распределяется неравномерно на ее поверхности. Поэтому приполярные области самые холодные. Здесь развита зона постоянно мерзлых пород и грунтов — криолитосфера. В Северном полушарии на широких пространствах суши с резко континентальным климатом эта зона распространяется далеко на юг, захватывая не только тундру, тайгу, но даже степь в Забайкалье и Монголии. По данным И. С. Щукина (1964), криолитосфера занимает около 26% всей поверхности суши, а в СССР — почти половину (49%) всей территории. Мощность постоянномерзлых пород в криолитосфере уменьшается с севера на юг. Наибольшая мощность мерзлоты в Сибири 600 м, в Северной Америке 400 м.

Мерзлота оказывает большое влияние не только на климат (хотя сама зависит от него) и растительность, но также и на рельеф. Для криолитосферы на Земле характерен своеобразный ландшафт. Это — в основном равнинная или горная тунд-

ра с болотами, термокарстовыми воронками и впадинами (аласы), буграми пучения, морозобойными трещинами, часто образующими полигональную сетку.

Другие планеты Солнечной системы, расположенные от Солнца дальше, чем Земля, являются и более холодными. Обширная информация в настоящее время получена для Марса.

Марс находится в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля. Это позволило исследователям еще до полетов автоматических станций считать его климатические условия более суровыми, чем на Земле. А. И. Лебединский и В. Д. Давыдов еще в 50-х годах предположили наличие отрицательных температур на поверхности Марса и возможное существование мерзлоты и оледенений. В. Д. Давыдовым была произведена теоретическая оценка глубины промерзания планеты. По его данным, мощность мерзлых пород на экваторе составляет 0,5 км, а на полюсах 2 км. По мнению многих исследователей, мерзлота считается одним из возможных источников существовавшей раньше воды на Марсе. Р. Лейтон, Б. Муррей, П. М. Фролов и Г. Н. Каттерфельд предполагали, что мерзлота образует сплошную зону между полюсами и 40—50° ю. и с. ш. В 1966 г. И. Я. Баранов теоретически рассмотрел возможные особенности планетарного развития мерзлоты Марса и подчеркнул, что состояние мерзлых или морозных пород должно определяться фактором равновесия мерзлоты с атмосферной влагой.

Американские и советские исследователи — Р. Шарп, Дж. Мак-Коли, Д. Андерсон, Д. Милтон, М. Карр и Г. Шабер, Т. Матч, Р. О. Кузьмин, К. П. Флоренский, А. Т. Базилевский

Расположение планет Солнечной системы

Планеты	Среднее расстояние от Солнца	
	в млн. км	в астрономических единицах
Меркурий	58	0,4
Венера	108	0,7
Земля	150	1
Марс	228	1,5
Юпитер	778	5,2
Сатурн	1426	10
Уран	2869	19
Нептун	4496	30
Плутон	5929	40

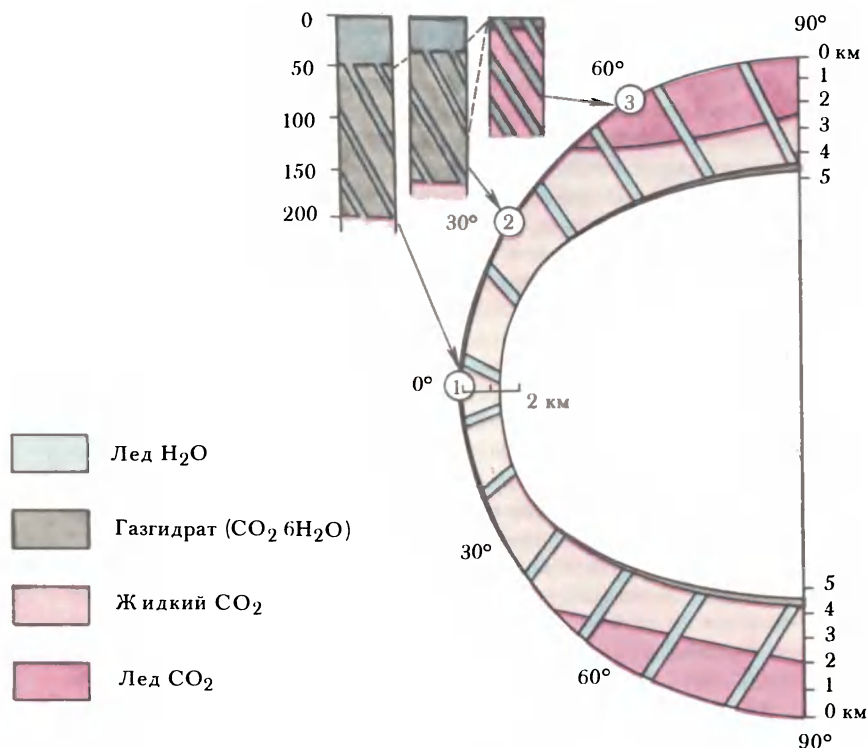
и другие — в своих работах рассматривали условия существования мерзлоты на Марсе и ее рельефообразующее значение.

При рассмотрении условий существования мерзлоты на любой планете встает вопрос о воде. На Земле вода выделялась и продолжает выделяться в настоящее время в процессе кристаллизации вещества мантии. В виде горячих растворов (гидротерм) и пара по трещинам она поднимается к поверхности. Часть ее вместе с другими летучими компонентами — азотом, кислородом, углекислым газом и другими — насыщает атмосферу. В современной атмосфере Земли воды в различных состояниях содержится до 2%, а углекислого газа 0,03%. В атмосфере же Марса, как указывалось выше, преобладает углекислый газ (95%), а водяных паров очень мало — доли процента.

Если предположить, что процесс кристаллизации вещества мантии Марса также сопровождался выделением летучих компонентов, то в атмосфере Марса, как и на Земле, воды когда-то могло быть значительно больше. Возможно, что вода улетучилась из-за низкого давления. В то же время существование отрицательных температур позволяет и по-другому подойти к этому вопросу. Выделяющаяся из недр Марса вода у поверхности должна замерзать. Образующийся слой мерзлых пород со льдом мог служить своего рода экраном, который задерживал поступающую из недр воду, и таким образом с течением времени могла формироваться мерзлотная зона Марса. Этим можно объяснить и высокое содержание углекислого газа в атмосфере Марса. Поскольку для перехода углекислого газа в твердое состояние требуется более низкая температура, чем для воды, то, поднимаясь снизу, он мог проникать через мерзлые породы; это привело к его избытку в атмосфере.

Представление о строении криолитосферы Марса основывается так же, как и для земной аналогичной зоны, на главных факторах — средней вековой температуре верхнего слоя пород, теплопроводности их в мерзлом состоянии и тепловом потоке недр. Вычисленные ранее теоретические значения среднегодовых температур Марса, дополненные прямыми измерениями, показали, что они изменяются в зависимости от широты от -29°C на экваторе до -93°C на северном полюсе и до -88°C на южном.

Величина теплового потока была рассчитана на основании анализа содержания радиоактивных элементов в поверхностных породах Марса. На основании этих данных Р. О. Кузьмин рассчитал мощность криолитосферы Марса, которая в несколько раз превышает максимальную мощность ее на Зем-



**Разрезы верхних горизонтов криолитосферы Марса по меридиану (1—3).
По Р. О. Кузьмину (1980 г.)**

ле. Наибольшая мощность мерзлоты установлена на полюсах — 4,2 км, наименьшая — 1,2 км — в экваториальной зоне.

Так как значения отрицательных температур на поверхности и в верхней части коры Марса позволяют существовать углекислоте в жидком, твердом и газообразном состоянии, а также твердому продукту взаимодействия воды и углекислоты — газгидрату, отсюда следует, что строение криолитосферы и ее состав в зависимости от широты могут изменяться как по глубине, так и по простираанию. Р. О. Кузьмин считает, что в экваториальной области Марса и в средних широтах мерзлотная зона с поверхности состоит из водного льда, глубже сменяющегося газгидратом, жидкой углекислотой и снова газгидратом. В полярных районах в верхней части зона может состоять из сухого льда или твердой

углекислоты, ниже сменяющейся жидкой углекислотой и газ-гидратом. Таким образом, криогенная оболочка Марса развита по всей его поверхности и имеет трехслойную структуру.

В пределах широтного пояса от 50° с. ш. до 50° ю. ш. наблюдается испарение льда, содержащегося в поверхностных породах вследствие дефицита насыщения атмосферы водяным паром. Поэтому здесь с поверхности должен находиться слой морозных, т. е. холодных сухих пород, а мерзлые породы, содержащие лед, должны располагаться несколько ниже. Для определения положения кровли мерзлых пород Р. О. Кузьмин использовал строение выбросов некоторых свежих метеоритных кратеров, напоминающих грязевые потоки на Земле. Появление таких выбросов объясняется тем, что при метеоритных взрывах происходит плавление ледосодержащих пород и последующее растекание разжиженного материала выбросов при падении его на поверхность. Поэтому присущие кратерам потоковидные выбросы могут служить показателем вскрытия мерзлых пород, а зная глубину кратера, можно говорить и о глубине залегания мерзлых пород. На основании этого предполагается, что в экваториальной зоне граница между морозными и мерзлыми породами находится на глубине около 350 м от поверхности; в направлении к полюсам она постепенно поднимается, и на широте $70\text{--}80^\circ$ непосредственно на поверхности существует уже лед. Согласно расчетам Р. О. Кузьмина, в криолитосфере Марса содержится $5 \cdot 10^{22}$ г воды, что почти в 100 раз превышает ее количество в подземных льдах Земли.

О существовании мерзлоты на Марсе свидетельствуют и различные формы рельефа, которые на Земле характерны для зоны многолетней мерзлоты. К ним относятся морозобойные трещины, солифлюкционные потоки, термокарстовые воронки, оползни и оплывины.

На детальных снимках Марса на его северных океанических равнинах, и в частности на равнине Утопия, наблюдается причудливая сеть трещин, местами образующая полигоны. Они очень напоминают земные трещины, возникающие в результате морозобойного растрескивания поверхности в тундре. Однако марсианские трещины по своим размерам в десятки раз превышают земные. Возможно, что громадная мощность мерзлоты в этих районах (2—3 км) обуславливает и развитие более крупных, чем на Земле, форм. Однако не исключено, что процесс морозобойного растрескивания использует уже существующие тектонические трещины, т. е. является вторичным, только осложняющим главный процесс. По некоторому сход-

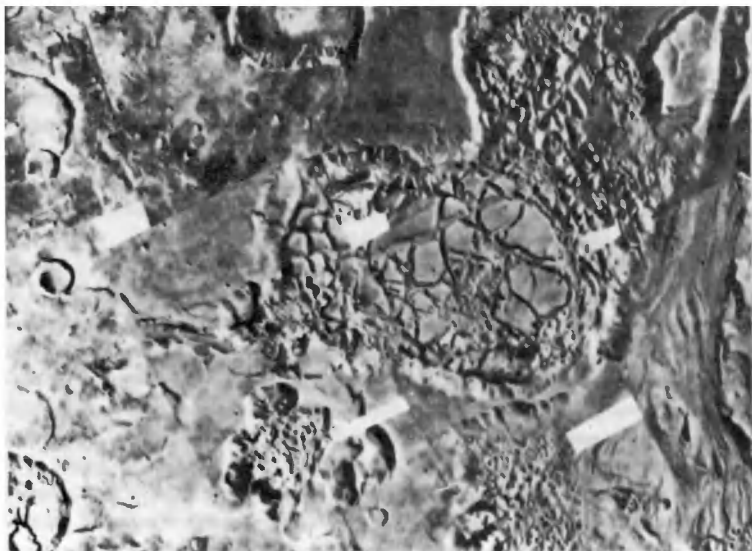
ству предполагается одинаковое происхождение марсианских и земных трещин, но утверждать это определенно нельзя, так как часто при внешнем сходстве форм причины образования их могут быть различными. Тем более что породы, подвергающиеся растрескиванию, на Марсе отличны от земных. Если на Земле это почти всегда рыхлые отложения — суглинки, глины, пески, то на Марсе это более плотные породы: вулканические лавы или реголит, перекрытые маломощным чехлом золотой пыли.

В континентальной области Марса на склонах и у подножия гряд и возвышенностей развиты шлейфы, какие обычно характерны для горных или равнинных тундровых зон Земли. Их образование связывается с сезонным оттаиванием мерзлоты, насыщением водой поверхностного материала и медленным его течением под действием силы тяжести по склонам, иногда совсем пологим ($1\text{—}3^\circ$). О движении материала свидетельствуют продольные линейные борозды, типичные для земных каменных потоков. Подобные образования отмечены на окраине континентальной области в горах Протонил и Нилосирт, и в ее центральной части восточнее бассейна Эллада. По-видимому, можно предполагать очень широкое развитие этих форм на поверхности Марса.

К формам рельефа, непосредственно связанным с мерзлотой, относятся термокарстовые воронки и плоские замкнутые понижения (аласы), возникающие при деградации (вытаивании) мерзлоты и просадке — провале поверхностных пород. Такие образования наблюдаются в Долине Маринер, где они достигают 10 км в диаметре. Аласоподобные формы в виде чашевидных впадин широко развиты также к югу от Долины Маринер, на Босфорской и Эритрейской равнинах.

Многие исследователи связывают с мерзлотой образование оползней и оплывин в Долине Маринер. Здесь днища отдельных долин — грабен — заняты огромными бугристыми массами оползней и обвалов. Особенности этих масс являются признаки текучести в их фронтальных частях в виде громадных потоковидных языков. Растекание материала могло происходить только под действием воды. Но откуда могла взяться вода в долинах? Сейчас ее там нет, и отсутствуют признаки, что она была там раньше. Р. О. Кузьмин считает, что она могла образоваться в результате таяния льда, сковывающего породы, под действием тепла, выделенного при трении и разрушении оползающих масс.

Помимо форм рельефа, имеющих сходство с земными, на Марсе имеются особые типы рельефа, отсутствующие на



Полигонально-блоковый рельеф Марса, образование которого связывается с таянием мерзлоты

Земле, но также связанные с мерзлотой. Это «хаотический» рельеф и своеобразные кратеры, окруженные так называемыми «лепешками».

В восточной части Долины Маринер и северо-восточнее ее на слабо наклонной, почти плоской равнине выделяются участки рельефа, представляющие собой скопление многочисленных гряд, холмов, плосковершинных блоков, разделенных глубокими понижениями — бороздами. Впервые увидевшие этот рельеф на космических снимках американские ученые Дж. Мак-Коли и М. Карр называли его хаотическим, так как видели беспорядочное расположение форм. Но затем дальнейшее изучение этого рельефа позволило Р. Вильсону и М. Пикарду выделить здесь несколько закономерно ориентированных систем тектонических трещин, которые и разбивают поверхность на блоки с прямоугольным или полигональным строением. Особенностью этого рельефа является прежде всего то, что повсеместно он расположен несколько ниже уровня окружающей поверхности и с ним связаны самые крупные долины Марса — Тиу, Арес и Симуд. Источником воды при образовании долин могла служить мерзлота, таяние которой сопро-

вождалось обрушением и просадкой пород с образованием полигонально-блокового (хаотического) рельефа.

Почему произошло быстрое таяние мерзлоты? Возможно, имело место общее потепление климата. Не исключается влияние внутреннего тепла, которое могло выделяться при поднятии к поверхности больших масс магмы.

Выше уже упоминалось, что выбросы некоторых кратеров напоминают грязевые потоки, объясняемые плавлением льда, содержащегося в породах, и последующее растекание материала по поверхности. Кроме кратеров с такими выбросами, на Марсе существуют и другие кратеры, облик которых свидетельствует о значительной роли мерзлоты при их образовании. Они как бы приподняты над окружающей поверхностью и находятся в центре своеобразной «лепешки». Диаметр «лепешки» чаще всего превышает диаметр кратера не менее чем в два раза. По-видимому, энергия, выделяющаяся при ударно-взрывных процессах, является причиной таяния мерзлоты. Вода, поднимающаяся вверх в раздробленных породах, у поверхности вновь замерзает, увеличиваясь в объеме, вспучивает поверхность, и таким образом вокруг кратера образуется структура типа «лепешки». Подобные кратеры развиты только на Марсе и отсутствуют на Луне и Меркурии.

Если на Земле мерзлота развита повсеместно, преимущественно в высоких и реже средних широтах, а на Марсе она сковывает почти всю поверхность, проникая на значительные глубины, то планеты, еще более удаленные от Солнца, должны быть более оледенелыми. И действительно, последние данные, переданные в 1979 г. на Землю с космической станции, подтвердили представления о том, что в составе пород спутников Юпитера большую роль играет лед. Так, низкая средняя плотность Каллисто, Ганимеда, Европы может служить доказательством того, что эти планетные тела состоят из смеси горных пород и льда. Многие кратеры на поверхности Ганимеда окружены венцами очень ярких лучей. Ученые предполагают, что это насыщенные льдом породы, выброшенные на поверхность при взрыве метеоритов, образовавших кратеры.

«Вояджер-1» исследовал еще более удаленную от Солнца планету Сатурн. В 1980 г. он сфотографировал Сатурн и некоторые его спутники. Оказалось, что лед в составе этих тел также играет большую роль, слагая наполовину или на одну треть их поверхность. Из ледяных обломков предположительно состоят и кольца самого Сатурна. Детальное изучение строения этих гигантских глыб льда — дело будущего.



Полярные шапки Марса: лед или углекислота?

Несмотря на то что полярные шапки Марса известны уже давно, с того времени, как их увидели в телескоп, строение их и в настоящее время вызывает споры. Белый цвет шапок позволяет предполагать, что они сложены льдом. Но какой это лед? Такой же, как в Антарктиде и Арктике?

Интересно, что размеры полярных шапок периодически изменяются, причем это совпадает со сменой сезонов года на Марсе. Так, зимой шапки увеличиваются в размерах, а весной и летом — уменьшаются. Если летом шапки ограничиваются приблизительно широтой 80° — 85° на севере и приблизительно широтой 80° на юге, то зимой они расширяются до 65° , а южная даже до 55° . В. Гершель, обративший на это внимание в 1784 г., считал, что полярные шапки состоят из снега и льда, и весной они сокращаются в размерах — тают, выделяя воду. Однако в 1969 г. с космической станции были получены данные, что полярные шапки состоят не из обычного водного, а из сухого льда — замерзшей углекислоты. Температура материала полярных шапок оказалась очень низкой — -125°C — как раз такой, при которой происходит конденсация углекислого газа.

Состав полярных шапок, по-видимому, более сложный и изменяется в зависимости от сезонов. Работы советских исследователей Ю. В. Алехина, И. В. Закирова, А. Т. Базилевского и К. П. Флоренского показали, что в составе полярных шапок есть и обычный лед, и сухой, состоящий из замерзшей углекислоты, а также лед промежуточного состава — газгидрат. Соотношение этих трех составных частей в полярных шапках меняется от сезона к сезону. Осенью с понижением

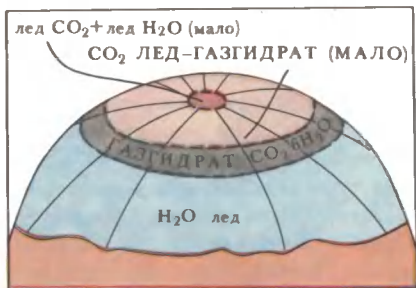
температуры до -73°C происходит вымораживание паров воды из атмосферы и образование устойчивого снегового покрова, состоящего из водного льда. Этот покров распространяется к югу и ложится на поверхность океанической равнины, на песчаные формы, кратеры, однако не перекрывает их полностью в силу своей очень незначительной — всего доли миллиметра — мощности. Зимой при дальнейшем понижении температуры образуется сначала газгидрат, который еще при более низкой температуре -148°C разлагается на твердые углекислоту и воду. С повышением температуры этот процесс имеет обратный ход, и весной уже снова образуется лед из твердой воды; летом с повышением температуры он перейдет в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Как результат этого процесса наблюдается уменьшение размеров полярных шапок.

Размеры полярных шапок Марса неодинаковы. Северная шапка несколько больше южной. Ее диаметр равен 1 000 км, тогда как южной 700 км. Предполагается, что абсолютная высота южной полярной шапки на 1—2 км больше северной.

Полярные шапки несколько сдвинуты от полюсов. Особенно это характерно для южной полярной шапки, которая вся располагается в стороне от географического полюса. С чем это связано? На Земле центр Антарктиды также смещен, хотя и ненамного, от южного географического полюса, а центр Северного Ледовитого океана не совпадает с северным географическим полюсом. По-видимому, причиной этого как на Земле, так и на Марсе является неравномерное распределение масс с различной силой тяжести внутри планеты в зависимости от ее вращения и изменения во времени положения магнитных полюсов.

Если рассматривать полярные шапки более внимательно, то обнаружится много интересных, порой не совсем понятных деталей и особенностей. На поверхности северной шапки наблюдается два куполовидных вздутия высотой от 200 до 1 000 м. Они разделяются Северным каньоном — широкой (до 10 км) долиной, прорезающей полярную шапку в диагональном направлении и приуроченной, по всей вероятности, к тектоническому нарушению. Куполовидное поднятие наблюдается и на южной полярной шапке. Что они собой представляют — пока не ясно. Это могут быть и тектонические купола, и подледные вулканы, какие наблюдаются в Исландии, и просто выступы основания, облекаемые льдом, как в Антарктиде.

Примечательной особенностью марсианских полярных ша-



**Предполагаемое
зональное строение и
состав полярных шапок
Марса в период их
наибольшего развития
(зимой). По Ю. В. Алехину,
И. В. Закирову и др.
{1977 г.}**

пок являются спиральные концентрические линии или полосы, хорошо выделяющиеся своим темным цветом на общем белом фоне поверхности. С одной стороны они как бы сходятся в центре, а с другой — они расходятся, описывая ряд окружностей вокруг этого центра. Особенно отчетливо эти линии выражены на северной полярной шапке, имеющей большую площадь по сравнению с южной. Здесь выделяются два центра с развитыми вокруг них концентрическими полосами. Долгое время исследователи спорили, являются ли они уступами или трещинами. Даже если бы существовали многочисленные трещины или трог, как предполагал Д. Катс, темные полосы представляли бы отвесные их стенки. Когда темные полосы увидели на фотографиях большего разрешения, оказалось, что это не что иное как многочисленные уступы извилистой формы, в целом образующие концентрически округлую структуру шапок.

Из чего состоят эти темные уступы, почему они отличаются от белой поверхности шапок и как они образовались? На все эти вопросы трудно ответить однозначно, и исследователи предлагают различные объяснения и гипотезы. Так, например, Д. Катс в 1973 г. предположил, что темный цвет полос объясняется таянием загрязненного льда полярной шапки на склонах южной экспозиции, получающих больше тепла по сравнению со склонами северной экспозиции. Вследствие этого на склонах обнажается вытаивающий обломочный материал, аналогичный, по-видимому, морене вытаивания на земных ледниках.

В том же году Б. Муррей предположил, что на полюсах развиты многочисленные слоистые поверхности, состоящие из водного льда или твердой углекислоты и силикатной пыли, а возможно, из их смеси. Уступы, в которых обнажается этот материал, предположительно выработаны ветром. Образование слоистых поверхностей можно связать с изменением накло-

на полярной оси Марса. Вокруг каждого нового положения полюса образовывались слоистые отложения.

Подобная точка зрения высказана А. Хаммондом. Темные и светлые полосы он связывает с наличием или отсутствием пыли в истории формирования марсианских полярных шапок. В соответствии с этим темные полосы состоят из пыли, а светлые — из льда. В настоящее время большинство ученых поддерживает эту гипотезу, придает ей большое значение при восстановлении климатических условий, существовавших на Марсе раньше. Концентрическое строение уступов, их выпуклая дугообразная форма в плане объясняется влиянием вращения планеты.

На происхождение уступов нет единой точки зрения. Повидимому, оно связано с комплексом процессов — эрозии ветром и разрушения под воздействием чередующихся процессов таяния и замерзания отложений и льда.

Таким образом, марсианские полярные шапки состоят из переслаивания пыли и льда, образующих крупные пластины. Длина пластин достигает 300—500 км. Каждая пластина имеет темный фронтальный уступ и светлую поверхность. Крутизна уступа от 4 до 12° , а светлая поверхность полого (1 — 2°) наклонена в противоположную сторону. Из-за асимметричного строения пластин в попе-



**Северная полярная шапка
Марса**

Светлые пятна — лед, темные
полосы — эоловые осадки,
обнажающиеся в уступах

речном профиле они образуют куэстообразные формы*. Каждая такая пластина состоит из 10—20 и более мелких темных и светлых слоев мощностью 20—30 м, придающих уступу характер лестницы. Общая мощность такой пластины достигает 1 км.

Пластины группируются в несколько серий. На северном и южном полюсах их выделяется по четыре. Формирование таких серий объясняется тем, что ось вращения Марса на протяжении последних 10 млн. лет могла перемещаться вследствие внутренних течений вещества в мантии, возможно, связанных с вулканической активностью. Около каждого такого положения оси в северном и южном полярных районах могла формироваться серия пластин. Количество серий — четыре в каждой полярной марсианской шапке — вызвало у некоторых исследователей вопрос: а нельзя ли связать их с оледенением на Земле? Как известно, на Земле выделяется четыре самостоятельных оледенения. И если на Марсе развиты также четыре ледниковых серии, то можно было бы, как считает В. И. Шмуратко, предположить общую для них причину — не планетарные, а глобальные, космические изменения климата. Во всяком случае, по строению шапок Марса можно предполагать циклические изменения его климата, связанные с изменением количества поступающей солнечной энергии, влияющей на циркуляцию атмосферы, образование ветров и т. д. Б. Муррей в этих циклических изменениях предполагает периоды в 51 000 лет и связывает с ними образование отдельных пластин и более продолжительные периоды в 2 млн. лет, в течение которых могли сформироваться серии пластин. Таким образом, возраст полярных шапок Марса может быть относительно молодым — несколько десятков миллионов лет. То, что на поверхности пластин почти отсутствуют кратеры, в какой-то мере подтверждает это. Однако возраст полярных шапок может быть значительно древнее. В связи с этим следует сопоставлять время образования полярных шапок не с четвертичными оледенениями Земли, укладывающимися в последние 1—0,6 млн. лет, а с началом более древнего оледенения Антарктиды.

* Куэста — асимметричная возвышенность в виде гряды с пологим склоном, совпадающим с углом падения пластов, и крутым склоном, срезающим пласты.



Загадки Венеры

Венера — наша ближайшая соседка. Ее размеры, масса и плотность пород близки к земным. Вместе с тем ее магнитное поле почти в три раза слабее, чем на Земле. Венера очень медленно вращается вокруг своей оси в направлении, обратном вращению Земли. Давление на ее поверхности достигает 10 млн. Па, а температура около $+500^{\circ}\text{C}$. На высоте 49 км над планетой простирается мощный слой облаков. Этим не исчерпываются загадки Венеры. Оставались неясными до последнего времени также причины резкого обеднения ее атмосферы водой, механизм ураганных ветров на высотах около 60 км, строение ее рельефа, состав слагающих пород и т. д.

Теперь, благодаря планомерному изучению планеты советскими учеными, многие ее тайны раскрыты.

В отличие от других планет земной группы, изучение Венеры с помощью телескопов оказалось невозможным. Ведь еще М. В. Ломоносов, наблюдая 6 июня 1761 г. прохождение планеты по диску Солнца, установил, что она окружена «знатною воздушною атмосферой, таковой (лишь бы не большею), какова обливается около нашего шара земного». Поэтому до последнего времени представления о строении поверхности и составе горных пород на Венере оставались гипотетическими. При этом некоторые исследователи приходили к фантастическим построениям. Предполагалось, например, что в атмосфере Венеры могут образовываться углеводороды. В этом случае, по мнению американского ученого Ф. Хойла, Венера должна быть покрыта океаном нефти. В другом варианте допускалось, что в атмосфере могут создаваться сложные молекулы, близкие к тем пластмассам, которые получают в за-

водских условиях, а поверхность планеты выстлана слоем природного пластика. По мнению американского исследователя Е. Эпика, для Венеры характерны сильные пыльные бури, нижние слои атмосферы насыщены пылью, что способствует поддержанию высокой температуры. В этом случае поверхность также должна быть покрыта слоем пыли, подобно тому как это предусматривалось «пылевой гипотезой» Т. Голда для Луны. Даже не верится, что все это всерьез обсуждалось еще совсем недавно. Но, чтобы убедиться, достаточно обратиться к книге Ф. Уиппла «Земля, Луна и планеты», которая в русском переводе была издана в 1967 г. Подобные представления запечатлены и в красочном альбоме «Планеты Солнечной системы», опубликованном в Праге в 1963 г. Этот альбом подготовили чешские исследователи Й. Садил и Л. Пешек, сочетая художественный вымысел с научными представлениями. На выразительных, ярких пейзажах изображены красноватые скалы, приближающаяся пыльная буря, вулканические кратеры с озерами кипящей серы, мрачные морские просторы, чахлые побеги растительности на берегах. На этих пейзажах получили отображение все основные точки зрения на природу поверхности, допускавшие здесь условия влажного климата с развитием органического мира, близкого к палеозойскому на Земле, сухой безводной пустыни или океанических пространств.

В 1961 г. был произведен запуск первого космического аппарата в сторону Венеры. Станция «Венера-1» прошла на расстоянии менее 100 000 км от планеты. «Венера-2», стартовавшая в 1965 г., приблизилась к планете на расстояние 24 000 км. 1 марта 1966 г. «Венера-3» успешно достигает поверхности планеты.

Станция «Венера-4» совершила межпланетное путешествие в 1967 г. Ее спускаемый аппарат плавно погрузился в атмосферу планеты с помощью парашюта. Были произведены измерения температуры, давления и состава атмосферы. В 1969 г. к Венере были отправлены станции «Венера-5» и «Венера-6». Их спускаемые аппараты провели зондирование атмосферы до высоты 20 км над твердой поверхностью. В 1970 г. спускаемый аппарат станции «Венера-7» совершил мягкую посадку на планету. В течение 23 минут после посадки с него поступали сигналы с информацией о работе приборов. В 1972 г. на поверхность планеты совершил мягкую посадку спускаемый аппарат станции «Венера-8», с которого в течение 50 минут поступала важная информация.

Выдающимися достижениями в изучении Венеры озна-

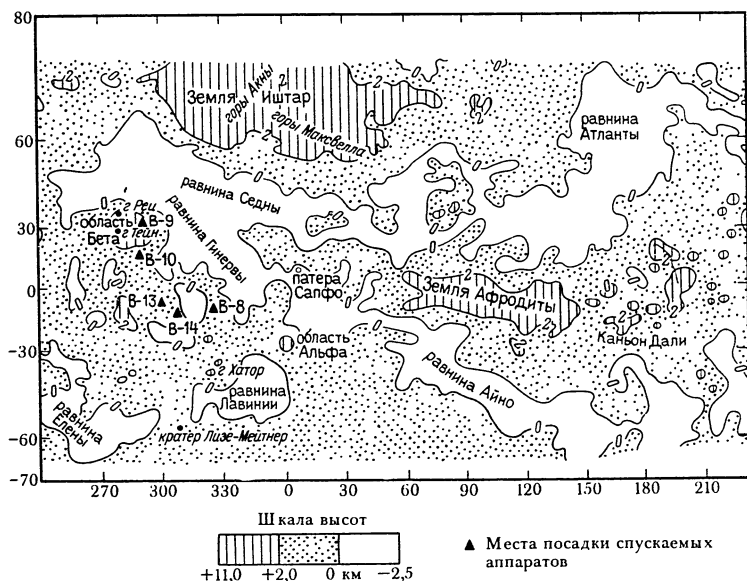
меновался 1975 г. Две станции «Венера-9» и «Венера-10» были выведены на орбиты искусственных спутников этой планеты. Их спускаемые аппараты плавно опустились на поверхность. С обоих аппаратов в течение 53 и 65 минут поступали панорамные телевизионные изображения местности и другая научная информация.

В 1978 г. изучение Венеры было продолжено станциями «Венера-11» и «Венера-12», которые достигли поверхности южной области Бета. Наконец, в 1982 г. станции «Венера-13» и «Венера-14», совершив мягкую посадку на поверхность планеты, позволили осуществить целый комплекс научных исследований, в том числе бурение и отбор грунта для химического опробования. В результате выдающихся исследований, выполненных АМС серии «Венера», на смену гипотезам пришли строгие научные данные. Появилась возможность приподнять завесу загадочности некоторых явлений на планете.

В настоящее время можно уже определенно говорить о составе венерианской атмосферы. Как предполагалось раньше, она состоит из углекислого газа — на 97%. Кроме него в количестве около 3% присутствует азот. Доли процентов приходятся на инертные газы (главным образом аргон), кислород, сероводород, соляную и плавиковую кислоты, водяные пары и некоторые другие элементы.

Громадное количество углекислого газа в атмосфере Венеры связывается в основном с вулканической деятельностью. И на Земле при извержении вулканов в атмосферу выбрасывается углекислый газ. Периодические изменения климата на Земле, приводившие к оледенениям, некоторые ученые связывают именно с колебанием содержания углекислого газа в атмосфере Земли. На Венере углекислая атмосфера создает своеобразный «парниковый эффект», не пропуская в космическое пространство тепловое излучение планеты. Возможно, этим объясняются высокие температуры у поверхности планеты, достигающие 470° С.

Особый интерес вызывают облака Венеры, полностью скрывающие ее поверхность от наблюдения с Земли. Они находятся на высоте около 49 км и достигают мощности 20 км. По данным советских исследователей Л. В. Ксанфомалити, М. Я. Марова и А. Д. Кузьмина, анализировавших данные, полученные станциями «Венера» и «Пионер-Венера», облака имеют слоистое строение. Верхняя часть облаков, по-видимому, состоит из капелек серной кислоты, а в средней и нижней их частях, по всей вероятности, преобладают соли соляной кислоты в виде кристаллических частиц.



Схематическая карта поверхности Венеры. Составлена по результатам радиолокационной съемки и измерения высот с АМС

Отмечается сложная динамика атмосферы и движения облаков. По-видимому, существуют мощные полярные вихри и просто сильные ветры, наиболее интенсивные на высотах более 40 км. У поверхности планеты ветры слабые. Этим объясняется и отсутствие пыли в местах посадок спускаемых аппаратов станций «Венера».

Из-за развития мощной атмосферы единственным надежным средством дистанционного изучения поверхности остается зондирование. С помощью наземных радиотелескопов были изучены приэкваториальная полоса и отдельные участки диаметром 1500 км. Эксперименты по радиокартированию Венеры были выполнены со станций «Венера-9» и «Венера-10». Отраженные от поверхности Венеры сигналы принимались земными радиотелескопами. При этом было установлено несколько протяженных уступов в южном полушарии, вытянутых в широтном направлении на несколько сотен километров при высоте до 3 км.

Радиолокационная съемка Венеры была осуществлена с американского спутника «Пионер-Венера». Разрешение этих радиоизображений порядка 30—50 км. По данным радиоло-

кационного зондирования, выполненного со спутника, составлена карта, охватывающая 83% поверхности планеты, между 75° с. ш. и 63° ю. ш.

Данные о рельефе Венеры позволяют выделить на ее поверхности низменности, представляющие собой впадины, холмистые равнины и горные массивы.

Низменности, расположенные ниже среднего уровня планеты (6051 км) на 1—2,5 км, занимают 16% ее поверхности. Они образуют две широкие дугообразные полосы впадин, расположенные по обе стороны экватора и соприкасающиеся своими выпуклыми частями почти по нулевому меридиану. Они имеют сглаженный рельеф и слабо насыщены кольцевыми структурами импактного происхождения, что указывает на относительно молодость рельефа.

Холмистые равнины занимают 60% поверхности. Их гипсометрический уровень не превышает 500 м от среднего уровня планеты. Они отличаются однородной отражательной способностью в радиодиапазоне. Основными формами рельефа являются небольшие гряды, холмы и западины. Поверхность равнин осложнена большим числом кольцевых структур-кратеров, диаметры которых достигают 400—600 км, а глубина 200—700 м. У некоторых структур намечаются центральные горки, что подтверждает их импактное происхождение. Относительно малая глубина кратеров вместе со следами разрушения свидетельствует об их древности. Отчетливо выраженные крупные кратеры получили наименования Лиза, Мейтнер, Сапфо и Ева. Многочисленны мелкие кратеры диаметром 150—200 км и глубиной в первые сотни метров. Наличие на поверхности холмистых равнин большого числа сильно разрушенных древних кратеров дает основание сопоставлять их с древними континентальными областями Луны и Марса. В пределах континентальных равнин практически нет крупных щитовых вулканов. Исключением может быть гора Хатор, однако ее вулканическая природа еще строго не установлена.

Возвышенные районы охватывают 24% поверхности, образуя четыре изолированных горных страны: Земля Иштар и Земля Афродиты и области Бета и Альфа. Земля Иштар представляет собой плато, осложненное горными сооружениями. Его высота 3—7 км над средним уровнем. Плато имеет форму широкого овала, вытянутого в широтном направлении на 2000 км. От смежных равнин оно отделено крутыми уступами. Относительно выровненный участок в пределах земли Иштар получил название плато Лакшми. Плато обрамлено горами Акны, Фрейи и Максвелла. В горах Максвелла заре-

гистрирована высшая точка планеты, возвышающаяся на 11,8 км над средним уровнем и на 9 км над примыкающей к горам местностью. На восточном склоне гор Максвелла расположен кратер диаметром 100 км и глубиной 1 км. Для него предполагается вулканическое происхождение.

Земля Афродиты имеет форму широтно ориентированного овала протяженностью 1500 км. Ее вершины поднимаются до 9 км над средним уровнем. По радиоастрономическим наблюдениям в пределах Земли Афродиты выделены округлые поднятия. Их поперечник составляет 700 км при высоте над окружающей местностью 6—8 км.

Область Бета представляет собой меридионально ориентированное поднятие высотой 5—6 км над средним уровнем, увенчанное двумя крупными щитовыми вулканами — горами Реи и Тейи. Один из вулканов имеет относительную высоту 5 км, а в поперечнике около 700 км. На его вершине находится кальдера диаметром около 90 км. Этот вулкан по своим размерам превышает величайший вулкан Марса — Олимп, однако уступает ему по высоте. Американские исследователи Р. Саундерс и М. Малин предположили, что венерианские вулканы не могут быть слишком высокими из-за большего, чем на Марсе, значения силы тяжести на планете. Кроме того на Венере активно должно происходить разрушение рельефа под действием химического выветривания из-за высокого содержания в атмосфере кислот и других активных компонентов.

Область Альфа представляет собой поднятие высотой 1800 м над средним уровнем. Оно отличается значительной изрезанностью в связи с развитием субпараллельных разломов.

Судить о тектонической природе возвышенных областей Венеры следует с учетом молодости и значительной расчлененности развитого в их пределах рельефа, отсутствия древних крупных разрушенных кратеров импактного происхождения, приуроченности к ним всех наиболее крупных щитовых вулканов, явной связи с рифтогенными структурами. Все это дает полное основание для сопоставления возвышенных областей Венеры с тектоно-вулканическими поднятиями Марса Фарсида и Элизий.

В центральной части планеты прослеживается целый ряд трещин, образующих рифтовую систему, имеющую, возможно, глобальный характер. В плане рифтовая система, по данным А. М. Никишина, напоминает огромный треугольник, ориентированный с востока на запад, основание которого распо-

ложено южнее поднятия Бета. В широтном направлении рифтовая система Венеры протягивается вдоль поднятия Афродиты на расстояние свыше 20 000 км.

Несмотря на развитие рифтовой системы, можно предположить, что в целом по сравнению с Землей и Марсом количество разрывных нарушений на Венере может быть меньше. Из-за медленного вращения планеты и малых значений сил Кориолиса на ней, по-видимому, не так интенсивно развита система планетарной трещиноватости.

Об основных этапах тектонической эволюции можно судить исходя из особенностей структуры поверхности Венеры с учетом данных сравнительной планетологии. Первоначально возникла древняя кора континентального типа, испытывавшая интенсивную метеоритную бомбардировку. По аналогии с Луной, этот процесс завершился примерно на рубеже 4 млрд. лет. Позднее образовались впадины, выполненные базальтами, так же как и на других планетных телах земной группы. Наиболее молодыми тектоническими элементами являются тектоно-вулканические поднятия, увенчанные, как и на Марсе, гигантскими щитовыми вулканами. Будем надеяться, что, в отличие от Марса, эти вулканы еще не прекратили своей активности. В этом случае получают объяснение особенности состава атмосферы Венеры и концентрация молний вблизи вулканов, свежесть обломочного материала и развитие крутых склонов вблизи поднятия Бета с его четко выраженными крупными вулканами.

Определение состава пород Венеры стало возможным после посадок на ее поверхность спускаемых аппаратов со станции серии «Венера», на которых были установлены гамма-спектрографы. Они проводили анализ содержания в грунте естественных радиоактивных элементов: урана, тория и изотопа калия. Тип породы в месте посадки спускаемого аппарата АМС «Венера-8» по содержанию радиоактивных элементов оказался близким к земным гранитам, в районах посадок «Венеры-9» и «Венеры-10» — к базальтам. Спускаемым аппаратом станции «Венера-10» была определена плотность грунта с помощью радиоактивного плотномера. Она оказалась $2,7 \text{ г/см}^3$, что полностью подтвердило данные радиолокации.

Просмотр последних панорам планеты и результаты химических анализов пород, по мнению советских ученых, позволяют прийти к заключению, что на 70% ее поверхность сложена древнейшими базальтами, аналоги которых на Земле образуются на глубинах 60—80 км. Предварительные данные химического анализа пород указывают, что в районе посадки

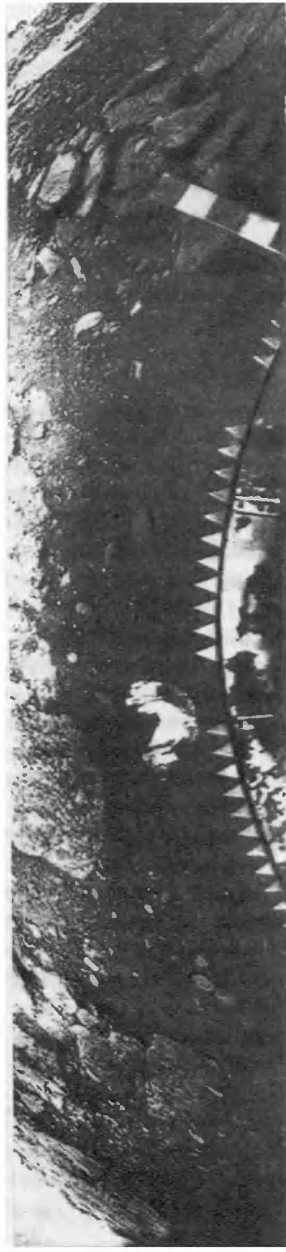
станции «Венера-13» залегает порода, претерпевшая химическое выветривание и отвечающая по составу лейцитовому базальту. Этот тип глубинных базальтовых пород с высоким содержанием калия и магния встречается в земных условиях достаточно редко. А порода, изученная в районе приземления станции «Венера-14» и представляющая собой толеитовый базальт, распространена на Земле довольно широко.

Для изучения строения поверхности особенно много дают телевизионные панорамные изображения, передаваемые со спускаемых аппаратов. Так, спускаемый аппарат станции «Венера-9» передал изображение поверхности северо-восточной окраины области Бета. Ее поверхность покрыта крупными остроугольными камнями. Поперечник самых крупных из них составляет 50—70 см при высоте 15—20 см. Они имеют форму пластин со ступенчатыми отколами. Между камнями поверхность покрыта светлым мелкоземистым материалом. На отдельных камнях видны темные пятна, напоминающие ячеи выветривания. Аппарат находится на склоне крутизной около 30°. Склон покрыт каменной осыпью. Острые грани осколков свидетельствуют о том, что они образовались совсем недавно и не подверглись значительным разрушениям.

Спускаемый аппарат станции «Венера-10» совершил посадку к юго-востоку от области Бета, примерно в 2000 км от места посадки спускаемого аппарата станции «Венера-9». Он передал изображение местности, представляющей собой ровную каменистую пустыню. Крупные глыбы имеют поперечник более 3 м, покрыты темными пятнами, отвечающими углублениям типа ячеи выветривания. Каменные глыбы погружены в темный грунт. Глыба расколота трещинами. По облику она напоминает земные магматические породы, подвергшиеся значительным изменениям.

На панорамах области Бета, полученных со станций «Венера-13» и «Венера-14», отчетливо изображены крупные глыбы скалистой слоистой породы темно-серого цвета с ячеистой поверхностью. Пространство между глыбами покрыто мелкозернистым буровато-черным материалом. Отсутствие заметных вторичных изменений изученных пород может свидетельствовать об их молодом возрасте.

Очень интересно решалась проблема отбора грунта на станциях «Венера-13» и «Венера-14». Как рассказывает В. Л. Барсуков, специальные грунтозаборные устройства произвели отбор проб пород, затем механизмы подачи грунта передали их внутрь герметичных отсеков. При этом был произведен сброс температуры отобранных проб с 457° до 20—30° С, а давле-

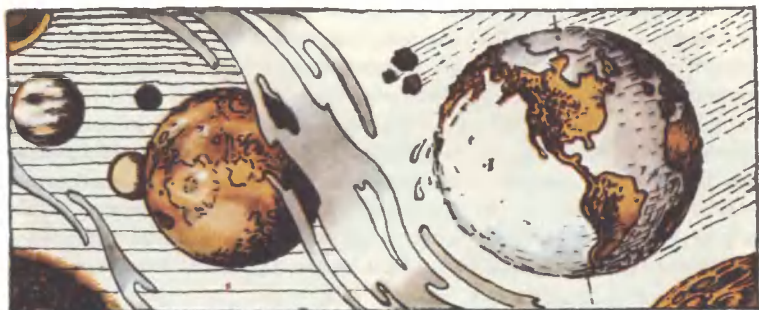


Панорама поверхности Венеры (АМС «Венера-13» и «Венера-14»)

ния — с 10 млн. Па до 10 тыс. Па. После этого пробы были поданы в приемные камеры рентген-флюоресцентных анализаторов, которые определили в них содержание основных породообразующих химических элементов (от натрия до железа) и передали полученные спектры на Землю. Вероятно, что состав атмосферы Венеры не может не оказывать влияния на породы ее поверхности. Этот вопрос был рассмотрен советскими учеными В. Л. Барсуковым и В. П. Волковым. Они исходили из новейших данных о различиях в составе восходящих и нисходящих потоков подоблачной тропосферы. Нисходящие потоки содержат повышенные концентрации водяного пара и серу. В состав восходящих потоков включаются газообразные продукты взаимодействия газов с горными породами, а также газы глубинного происхождения. Расчеты показали, что при взаимодействии нисходящих потоков тропосферы с базальтами возникают пирит, ангидрит и амфиболы, тогда как в случае восходящих потоков образуются только пирит и ангидрит. При этом породы типа гранитов не должны испытывать существенных преобразований. Однако авторы справедливо замечают, что величина такого рода химического выветривания не может быть надежно определена, поэтому неясно, покрыта ли Венера сплошь измененными породами или только тонкими поверхностными пленками.

Изучение Венеры продолжается. В соответствии с программой исследований космического пространства и планет Солнечной системы в июне 1983 г. в Советском Союзе осуществлены запуски АМС «Венера-15» и «Венера-16». Обе станции аналогичны по конструкции и назначению. Полет двух станций даст возможность провести независимые комплексные измерения над различными районами Венеры с орбит искусственных спутников этой планеты.

Каждый новый результат изучения планет приближает нас к более глубокому познанию Земли, и в этом существенная роль принадлежит достижениям советской науки, благодаря которым представилось возможным раскрыть некоторые тайны Венеры.



Почему планеты асимметричны

В самых различных отраслях естествознания сейчас широко используется учение о симметрии как методе познания фундаментальных закономерностей в строении и эволюции материи на всех уровнях ее организации — от физических полей и элементарных частиц до Вселенной в целом. Развитие учения о симметрии, асимметрии и диссимметрии (расстроенной симметрии) связано прежде всего с именами Е. С. Федорова, П. Кюри, В. И. Вернадского, А. В. Шубникова. Нас будет интересовать приложение этого учения к решению глобальных тектонических проблем. В структуре литосферы Земли отчетливо проявлены признаки симметрии и асимметрии, которые требуют своего объяснения при обосновании тех или иных геодинамических моделей. Поэтому можно говорить о тектонической симметрии и асимметрии как о важных свойствах внешних геосфер, подверженных тектоническим деформациям. Характерными примерами тектонической симметрии являются срединно-океанические хребты (или их фрагменты), рифтовые структуры, некоторые геосинклинально-складчатые зоны. Но в глобальном аспекте Земля тектонически асимметрична. Асимметрию придает ей впадина Тихого океана, занимающая на планете огромную площадь. Вполне оправдано обособление на Земле двух сегментов: Тихоокеанского и противоположного ему — Атлантического.

Возникает вопрос: в чем же причина глобальной тектонической асимметрии Земли и как эта главнейшая особенность в строении увязывается с существующими геотектоническими концепциями и с новейшими данными о строении других планет земной группы и Луны?

Глобальная асимметрия Земли обнаруживается при рассмотрении ее в географическом, океанографическом и тектоническом аспектах. Отчетливо обособляется Тихоокеанская планетарная депрессия со средней глубиной около 4 км, занимающая примерно $\frac{1}{3}$ общей площади поверхности Земли. Она обрамлена гирляндами островных дуг и горными складчатыми системами окраин континентов. Далее в глубь континентов лежат древние платформы. С океанографических позиций могут быть вполне отчетливо выделены континентальные и океанические полушария. При этом площадь акватории Тихого океана составляет около 180 млн. км², или половину площади всего Мирового океана. В тектоническом аспекте дно Тихого океана — это прежде всего огромная часть планеты, лишенная так называемого гранитного слоя. Под дном Индийского океана и Атлантики такого слоя также нет (за исключением сравнительно небольших участков — микроконтинентов), но площадь безгранитной коры в целом значительно меньше.

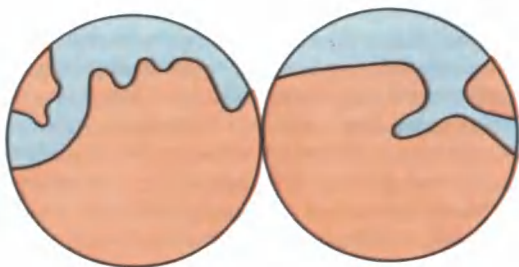
Тихоокеанскую впадину обрамляет одноименный тектонический пояс. Особенностью пояса является структурная связь его крупных элементов друг с другом. Получается тектоническое кольцо, смыкающее Азию и Северную Америку с одной стороны и Австралию, Антарктиду и Южную Америку — с другой.

Интересно, что многие континентальные окраины Тихоокеанской области уже были приокеаническими зонами по крайней мере миллиард лет тому назад. Это относится к кордильерам Северной Америки, Восточной Австралии, Юго-Восточного Китая. Сихотэ-Алинь был зоной островных дуг и краевых морей в среднем палеозое. Что касается Анд Южной Америки, то тут приокеаническая зона выявляется для мезозоя. Любопытен и другой факт. Оказывается, что в геосинклинально-складчатых областях Тихоокеанского пояса происходит омоложение времени тектогенеза от внутренних его частей к краю океана.

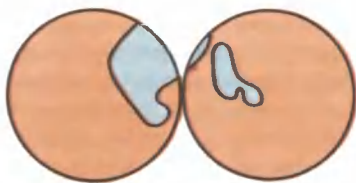
Все это вместе создает впечатление об устойчивости во времени и в пространстве Тихоокеанского подвижного пояса. Но вопрос оказывается более сложным. На периферии огромной океанической впадины естественно ожидать постоянное проявление высокоактивных тектонических, магматических, сейсмических и седиментационных процессов, подобных современным. Расшифровать их для геологического прошлого удастся не всегда. Основная причина — в крупных перемещениях литосферных плит. Существует мнение о дрейфе Австра-



Земля



Марс



Луна

Тектоническая асимметрия Земли, Марса и Луны

Красным показаны континентальные сегменты планет, синим — океанические сегменты

лии и Южной Америки на большое расстояние. Вероятно, происходило и движение Северной Америки в сторону Тихого океана. Время этих перемещений несколько различное, однако в основном оно укладывается в рамки мезозоя и кайнозоя. Соответственно структурный план Тихоокеанского кру-

гового пояса скомпановался в это время. Все же для полукольца, расположенного в Северном полушарии, палеотектонические реконструкции возможны вплоть до позднего докембрия. Тем самым дополнительно подчеркивается главная тектоническая асимметрия нашей планеты.

Итак, Земле свойственна глобальная структурная неоднородность. В ее пределах обособляется сегмент, включающий Тихий океан и обрамляющий его Тихоокеанский тектонический пояс, характеризующийся высокой степенью подвижности и проницаемости литосферы. И другой сегмент — где сосредоточены все древние платформы, геосинклинально-складчатые пояса (их разделяющие) и вторичные океаны. Из такого противопоставления следует, что обе эти части должны были развиваться отличными путями чрезвычайно длительное время.

Неожиданное подтверждение такому взгляду пришло в результате изучения Луны.

До того как Луна была исследована с помощью автоматических межпланетных станций, существовала гипотеза о том, что на ее обратной стороне имеется Океан Антиподов, по аналогии с Океаном Бурь видимой стороны, и в целом Луна обладает симметрией. Первые же снимки обратной стороны Луны показали, что естественный спутник Земли также асимметричен и разделяется на два различных по структуре сегмента. Полушарие, обращенное к Земле, характеризуется распространением лунных морей, тогда как на обратной стороне морей почти нет и там простирается материковая поверхность, усеянная многочисленными кратерами.

Впадины Океана Бурь и лунных морей сконцентрированы в северной части видимого полушария. Так же, как и на Земле, они выполнены базальтами. В целом проявляется аналогия в строении впадин лунных морей и земных океанических впадин. Примечательно, что впадины на Луне занимают примерно $1/3$ часть ее поверхности, что близко к соотношению Тихоокеанского и Атлантического сегментов Земли. Радиологический возраст базальтов, выполняющих впадины Луны, показывает, что на Луне глобальная тектоническая асимметрия возникла еще на ранних стадиях ее эволюции.

Гравитационные и сейсмические данные показали неоднородность в строении коры и мантии Луны. В пределах океанического сегмента мощность коры сокращена до величины порядка 60 км, тогда как для обратной стороны Луны с континентальным строением допускается толщина коры в 100—150 км. При этом мощность базальтового выполнения лунных

морей оценивается величиной всего в несколько километров, что приближается к мощности базальтового слоя океанической коры на Земле. В пределах океанического сегмента Луны отмечены аномально высокие скорости продольных сейсмических волн, что можно объяснить воздыманием кровли мантии, как это имеет место на Земле под океаническими впадинами.

После получения первых фотографий обратной стороны Луны с помощью АМС «Луна-3» в 1959 г. были высказаны разные соображения о причинах асимметрии видимого и обратного полушарий естественного спутника Земли. Известный советский астроном А. А. Михайлов доказал несостоятельность гипотез, объясняющих асимметрию Луны воздействием Земли. Так, гравитационное притяжение Земли, вызывающее твердые приливы в лунной коре, на видимой стороне всего на 0,5% больше, чем на обратной стороне Луны.

Однако в прошлом, когда Земля и Луна были сближены, приливное воздействие Земли было гораздо более значительным. Расчеты показали, что при расстоянии Луны от Земли, составляющем одну треть от современного, гравитационное воздействие на видимой стороне могло быть в 10 раз больше, чем на обратном полушарии Луны, а при сокращении расстояния до одной десятой эти различия возрастали в 10 тыс. раз. Гравитационное воздействие Земли должно было способствовать созданию глобальной тектонической асимметрии с формированием океанического сегмента именно на видимой стороне.

Гравитационное воздействие Земли несомненно проявлялось на самых ранних стадиях формирования Луны, усиливая ее первичную неоднородность, а также образование более мощной коры на обратной стороне, что согласуется с характером гравитационного поля.

В случае связи асимметрии с развитием системы Земля — Луна следовало бы ожидать симметричного расположения морского сегмента на Луне относительно центра обращенного к Земле полушария Луны. В действительности же здесь располагается так называемый Центральный перешеек с континентальным строением, тогда как морские впадины смещены к северу. Поэтому асимметрия Луны должна быть объяснена другими, внутренними причинами, отрицающими влияние нашей планеты на глобальную структуру ее естественного спутника.

В свое время пользовалась популярностью гипотеза В. Пикеринга, которая объяснила происхождение Тихоокеанской впа-

дины отрывом Луны. Позднейшие расчеты показали несостоятельность «гипотезы отрыва». Глобальная асимметрия свойственна и другим планетам земной группы, прежде всего Марсу, у которой нет крупных спутников типа Луны, что свидетельствует против представлений о возможной связи асимметрии с развитием системы планеты и ее спутника.

Для обоснования неоднородности в структуре Луны с выделением сегментов или блоков глобального масштаба важное значение имеют сведения о сейсмичности. Показательна концентрация эпицентров лунотрясений в зонах сочленения континентального и морского сегментов. При этом континентальный блок в юго-восточной части видимой стороны Луны практически асейсмичен. Намечаемая аналогия с распределением глубокофокусных землетрясений на Земле, сконцентрированных в Тихоокеанском периокеаническом поясе, вполне закономерна.

Что касается Марса, то в его северном полушарии развита депрессия планетарного масштаба, тогда как южное полушарие представляет собой возвышенный материк. Следовательно, и на Марсе устанавливается глобальная тектоническая асимметрия с обособлением северного океанического и южного континентального полушарий. В пределах океанического полушария Марса преобладают положительные аномалии гравитационного поля, свидетельствующие о сокращенной мощности коры.

Экваториальный пояс Марса с проявлениями вулканизма и тектонических деформаций занимает промежуточное положение между океаническим и континентальным сегментами, что позволяет сопоставлять его с Тихоокеанским поясом Земли.

Что касается Меркурия, то в настоящее время снимки получены лишь на 40% его поверхности. Однако на них вполне определенно выявляются основные особенности его тектоники. Подобно Тихоокеанской впадине Земли и обширной депрессии Океана Бурь на Луне, здесь также выделяется депрессия планетарного порядка — впадина Калорис (Море Жары).

По периферии впадины Калорис намечается серия концентрических поднятий, которые могут быть сопоставлены с лунными кордильерами и тектоническими сооружениями Тихоокеанского пояса Земли. Экстраполируя очертания впадины Калорис на всю поверхность Меркурия, получим ее отношение ко всей площади — $\frac{1}{3}$, т. е. те же соотношения, что и у других небесных тел.

Из вышесказанного видно, что сравнительная планетология раскрывает весьма важную общую закономерность в строении Земли, Луны, Марса и Меркурия — их структурную асимметрию. Она проявляется независимо от размеров, массы, плотности, расстояния от Солнца этих небесных тел и выражается первичной неоднородностью в распределении вещества в их верхних оболочках.

Глобальная структурная асимметрия — свойство, устойчивое во времени. Если то, что здесь сказано, справедливо в отношении Земли, то мы находим объяснение глубокому различию в истории развития ее Атлантического и Тихоокеанского сегментов. Образование континентов, их раскалывание, возникновение вторичных океанов и впадин с субокеанической корой — все это относится лишь к Атлантическому сегменту, обособленному еще при первичной дифференциации вещества. Кольцевой Тихоокеанский тектонический пояс представляет собой поверхностное выражение зоны разграничения обоих сегментов. В нем происходят весьма сложные тектономагматические процессы, обусловленные глубинным взаимодействием на разных уровнях разнородных областей тектоносферы.

Итак, на ранних стадиях формирования литосферы упомянутых здесь небесных тел возникали огромные депрессионные формы, занимающие примерно $1/3$ их поверхности. Такое явление можно связать с некоторым дефицитом вещества, возникшим вследствие образования первозданных континентов. Впоследствии этот дефицит компенсировался базальтовыми излияниями. Возможно, что истоки неоднородностей восходят еще к стадии аккреции протопланетного вещества, включающего сравнительно крупные ассоциации типа планетезималей.



Историческая планетология

Геологи широко используют сравнительно-исторический метод познания. Изучая слои горных пород, окаменевшие остатки ископаемых организмов, пользуясь самыми совершенными методами определения возраста горных пород и минералов, геологи стремятся воссоздать историю развития различных регионов и всей Земли в целом. Считается, что возраст Земли близок ко времени формирования вещества метеоритов, то есть 4,6 млрд. лет. Земля сформировалась в результате аккреции протопланетного вещества. Этот процесс был очень сложным, так как уже в период аккреции могли происходить частичная дифференциация вещества и его разогрев. Довольно быстро образовалась первичная кора, о строении и составе которой пока можно только догадываться.

В это же время Земля подвергалась своего рода «тяжелой бомбардировке» из остаточного метеоритного роя, а ее поверхность должна была во многом напоминать современную поверхность Луны или даже скорее Марса. Еще акад. А. П. Павлов в начале века назвал эту стадию развития Земли лунной, хотя нам кажется, что более правильно называть ее марсианской, так как уже на самых ранних этапах на Земле, подобно современному Марсу, должны были проявляться элементы атмосферы и гидросферы. От гигантских кольцевых структур этого времени сохранились лишь реликты первичного кольцевого рисунка, которые усматриваются на космических изображениях земной поверхности. Интересно отметить, что в земных породах пока не установлено достоверных датировок древнее 3,8 млрд. лет. Не связано ли это с этапом «тяжелой бомбардировки», которая, кстати, у Земли ввиду

ее большой массы и, соответственно, суммарной массы остаточного роя метеоритов, должна была быть гораздо более интенсивной, чем у Луны или Марса. По-видимому, реликтов истинной первичной коры на Земле могло и не сохраниться, так как до сих пор не найдено горных пород более древнего возраста. Поэтому этап аккреции, формирования протокоры и «тяжелой бомбардировки» часто называют догеологической эрой, о событиях которой можно судить пока только на основе сравнительно-планетологического метода. Будем надеяться, однако, что материалы для суждения об этом далеком времени будут все-таки получены в результате сверхглубокого бурения, если в недрах земной коры или верхней мантии будут вскрыты реликты протокорового вещества.

Дальнейшая история Земли может рассматриваться как собственно геологическая. Известны лишь немногие пункты нахождения древнейших горных пород с достаточно достоверными датировками. Например, в Гренландии выявлены амфиболиты, анортозиты и граниты с возрастом 3,75 млрд. лет. Многие исследователи допускают, что первоначально в пределах современных континентов возник гранулито-базитовый слой коры в процессе дифференциации мантийного вещества. В дальнейшем были широко проявлены процессы гранитизации. Об источниках гранитного материала ведутся споры. Предполагается, что он мог образоваться в результате дальнейшей дифференциации глубинных пород. Однако более вероятно, что появлению в коре Земли кислых пород, образовавших граниты и мигматиты, способствовало разделение вещества при формировании осадков в древнейших морских бассейнах.

По крайней мере, уже на раннем этапе геологического развития Земли появился чехол древнейших осадочных и вулканических пород. Неоднократное проявление гранитизации, многофазный метаморфизм, расколы с образованием глубоких прогибов, местами с выдавливанием вдоль них мантийного материала, сложный вулканизм — эти события были далеко не одинаковыми в каждом из регионов Земли. Только в конце этого этапа при формировании так называемой зрелой континентальной коры был проявлен процесс, который был назван А. А. Богдановым кратонизацией. Для него характерны интенсивный вулканизм и формирование массивов калиевых гранитов типа рапакиви. В дальнейшем такие участки коры оставались в большинстве случаев сравнительно стабильными, выделяясь в виде древних платформенных областей, частично перекрытых чехлом более молодых осадков, отложенных реками, в озерах и мелководных морях.

Океанические впадины, существующие в настоящее время, возникли сравнительно недавно. Возраст базальтов, vyplняющих их ложе, не древнее мезозоя: 240 млн. лет. Отмечается омоложение возраста базальтов от краев океанов к срединно-океаническим хребтам. Только для Тихого океана допускается более древний возраст на основе изучения горных пород его обрамления, так называемого Тихоокеанского кольца. По поводу происхождения океанической коры существуют две основные гипотезы. Одна из них связывает образование такой коры с процессом базификации. Чл.-корр. АН СССР В. В. Белоусов полагает, например, что этот процесс связан с дифференциацией мантии, насыщением и переработкой более ранней континентальной коры при подъеме пород основного состава, и как следствие этого — утяжелением коры с образованием океанических впадин.

В последние годы стала особенно популярной концепция «новой глобальной тектоники», или «литосферных плит». В ее основе лежат представления о том, что океанические впадины возникают путем расхождения (спрединга) литосферных плит, которые дрейфуют по слою пониженной вязкости — астеносфере. Скорость движения плит составляет около 1 см в год, лишь в некоторых районах она возрастает до 10 см. В пересчете на многие миллионы лет это дает эффект горизонтального перемещения плит на сотни и тысячи километров. В местах расхождения плит прослеживаются гигантские трещины — мировая рифтовая система. Вдоль таких трещин формируется молодая океаническая кора. В местах столкновения плит возникают горные сооружения, складчатые системы, иногда породы океанической коры и даже верхней мантии оказываются выжатыми на поверхность. В других случаях края океанических плит погружаются в мантию. Этот процесс назван субдукцией. Он наблюдается вдоль островных вулканических дуг, сопровождаемых глубоководными желобами. Примерами таких дуг служат Курильские и Японские острова. Такое погружение приводит к концентрации очагов землетрясений вдоль наклонных поверхностей, получивших название зон Заварицкого — Беньофа. Плавление погружающегося материала приводит к появлению вулканов на поверхности. Такие поверхности прослежены по очагам глубокофокусных землетрясений до глубин в 700 км. По мнению акад. А. В. Пейве, срывы пластин земной коры могут происходить на разных уровнях, прежде всего по поверхности Конрада и Мохоровичича. В результате подобного сучивания и возникают горные сооружения, в пределах которых породы разной глубинности смяты в складки

и находятся в сложных тектонических взаимоотношениях.

Сейчас уже накоплено много данных в пользу таких представлений. Впечатляет близость очертаний противоположных берегов Атлантического океана, отмеченная еще А. Вегенером в начале этого столетия. Предполагается, что все южные континенты Земли до мезозоя составляли единый суперматерик Гондвану, о чем свидетельствуют общность населявших их в прошлом животных и растений, а также палеомагнитные и палеоклиматические данные.

Вызывает большие споры вопрос о том, могли ли происходить аналогичные перемещения литосферных плит на заре геологической истории. Этот вопрос пока остается еще более неясным. Реликты океанической коры встречаются в современных горных сооружениях, например в Альпах, на Кавказе и на Урале. По мнению одних исследователей, такие коры возникали в результате расхождения литосферных плит с образованием в этих местах океанических впадин, близких по размерам современному Атлантическому океану. Однако не исключено, что здесь могли возникать достаточно глубокие, но сравнительно небольшие впадины, отвечающие по размерам современным глубоководным впадинам Средиземного и Красного морей, где кора близка к океанической.

Возможны и другие объяснения происхождения океанической коры. По мнению Е. Е. Милановского, более вероятно образование такой коры при пульсациях (сменах расширений и сжатий) Земли, происходящих на фоне некоторого общего расширения.

Во всяком случае, каковы бы ни были причины деформаций масс горных пород на Земле, важно подчеркнуть, что наша планета до сих пор не утратила своей активности. Современные движения в виде поднятий и опусканий отдельных участков, горизонтальных перемещений блоков коры устанавливаются инструментально, например путем проведения высокоточных повторных нивелировок, в том числе с использованием лазерных дальномеров. В районах высокой активности проявляются сейсмичность и вулканизм. Общеизвестны гигантские катастрофы, происходящие уже в историческое время. Достаточно вспомнить о грандиозном взрыве вулкана Санторин, что привело к гибели в пучинах Эгейского моря целой цивилизации, возможно даже Атлантиды.

А как же эволюционировали другие планеты земной группы?

История Луны сейчас уже достаточно хорошо известна. Правда, по-прежнему ведутся споры о том, где же она все-та-

ки возникла: в окрестностях Земли или совсем в другом месте. Особенности состава лунных пород дали основания для предположений о том, что первоначально она возникла из высокотемпературной части протопланетной туманности, ближе к Солнцу, располагаясь внутри орбиты Меркурия. В дальнейшем из-за приливных эффектов она переместилась ближе к Земле и попала в сферу ее тяготения. По другим представлениям, Луна образовалась одновременно с Землей из единого сгустка протопланетного вещества. При этом Луна возникла в краевой части сгустка, что хорошо согласуется с данными о ее гораздо меньшей плотности по сравнению с Землей. Ведь уже на самых ранних стадиях аккреции планетных тел должна начинаться дифференциация вещества под действием гравитационных сил.

Ранний этап эволюции — это формирование континентальной коры Луны габбро-анортозитового состава. Он продолжался около 4 млрд. лет. В это время происходили сложные процессы магматической дифференциации с выплавлением основных магм, их подъемом к верхним частям коры с застыванием в близповерхностных условиях под тонким чехлом уже сформированной коры. Поверхность Луны в это время интенсивно перерабатывалась под воздействием ударов крупных метеоритов. В результате их взрывов горные породы преобразовывались в импактные брекчии. Возникло множество крупных кратеров поперечником в десятки и сотни километров. В конце этого этапа имело место усиление метеоритной бомбардировки. На этапе формирования лунной коры континентального типа Луна уже несомненно была спутником Земли.

На рубеже 4 млрд. лет поверхность Луны подверглась особенно значительной бомбардировке огромными телами астероидных размеров. Этот этап так и называют — этапом «тяжелой бомбардировки». Возникшие депрессии были заполнены базальтами. Формирование лунных морей было длительным и, возможно, в отдельных случаях затянулось до рубежа, близкого к 3 млрд. лет. Наиболее молодая датировка кристаллической лунной породы составляет 3,16 млрд. лет. Ввиду меньшей мощности континентальной коры на видимой стороне взрывы метеоритов открывали выход базальтовой магме. Поэтому именно здесь сконцентрированы основные моря, а днища многих крупных кратеров также выполнены базальтами.

Послеморская история развития Луны менее богата событиями. Продолжалась метеоритная бомбардировка. Достоверных следов молодого вулканизма не обнаружено. Разруше-

ние поверхностного слоя горных пород привело к образованию мощного покрова реголита. Тектонические движения проявлялись в возникновении крупных трещин. Сейчас Луна практически утратила свою тектоническую активность. Из большого числа слабых лунотрясений, зафиксированных сейсмографами за 8-летний период работы, лишь несколько десятков могут быть причислены к тектоническим. Большинство из них связано с источниками на глубинах порядка 800—100 км, где могут существовать частично расплавленные породы. Здесь предполагается развитие астеносферы. Лишь очень небольшое число очагов тектонических лунотрясений располагается на малых глубинах — в верхней части лунной литосферы. Эффект этих слабых сейсмических толчков крайне незначителен. Огромная мощность лунной литосферы по сравнению с земной при слабом развитии астеносферы — вот причина незначительной современной тектонической активности.

Тектоническая эволюция Меркурия во многом близка к лунной, хотя здесь есть и существенные отличия. От раннего этапа развития сохранились кратерированные равнины — аналоги лунных континентов. В дальнейшем на Меркурии был проявлен этап древнего вулканизма, следы которого — это обширные вулканические плато, образовавшиеся среди кратерированных равнин. Судя по степени насыщенности кратерами, так же как и на Луне, примерно 4 млрд. лет назад здесь происходила «тяжелая бомбардировка», в результате которой возникли впадина Калорис и другие депрессии, заполнившиеся вулканическими образованиями. В этот же период возникли разломы — взбросы и надвиги, свидетельствующие о сжимающих усилиях в коре планеты. Подсчеты показывают, что они являются следствием сокращения радиуса Меркурия на 1—2 км. Признаки дальнейшей тектонической активности не установлены.

Эволюция Марса была более сложной и насыщенной событиями. Первоначально здесь также возникла кора континентального типа. Судя по степени насыщенности кратерами, формирование поверхности кратерированных равнин южного полушария завершилось, так же как и на других планетных телах, до рубежа 4 млрд. лет. После этого возрастного рубежа усилилась вулканическая активность, в результате которой образовалась выполненная базальтами Великая Северная равнина (океаническое полушарие) и возникли обширные вулканические плато на континентальном южном полушарии. В отличие от Луны, вулканическая деятельность несомненно была более длительной и отчетливо многофазной. По имеющимся

оценкам этот процесс мог завершиться на рубеже порядка 2 млрд. лет, хотя безусловно, на отдельных участках мог продолжаться и позднее, например на плато Гесперия. В отличие от Луны и Меркурия, на этом тектоно-магматическая эволюция Марса не закончилась. В приэкваториальной части возникли обширные сводовые поднятия Фарсида и Элизий, увенчанные грандиозными щитовыми вулканами, образовались многочисленные гигантские разломы, в том числе рифтовая система Маринер. Оценки возраста этих событий пока еще очень противоречивы. Однако свежесть форм рельефа в сочетании со слабой кратерированностью позволяют предполагать, что последние вулканические излияния на Марсе происходили в интервале 0,5—0,2 млрд. лет. Дальнейшая история Марса ознаменовалась существенными преобразованиями поверхности за счет деятельности ветра, «потоков воды», таяния мерзлоты, проявления оползней и обвалов на крутых склонах.

Судить об этапах эволюции других планет земной группы и спутников планет-гигантов еще более трудно, так как выделение возрастных рубежей только по степени насыщенности поверхностей метеоритными кратерами не очень надежно. Вместе с тем даже сопоставление развития Земли, Луны, Меркурия и Марса позволяет установить некоторые общие закономерности, что представляет особый интерес для целей сравнительной планетологии.

Первым этапом эволюции для небесных тел было становление первичной коры континентального типа. На рубеже около 4 млрд. лет проявилась «тяжелая бомбардировка», причины которой, включая вероятную синхронность этого события, еще нуждаются в своем объяснении. Если предположить, что метеориты астероидных размеров происходили из остаточного роя протопланетного вещества, то трудно объяснить синхронность событий для разных небесных тел с совершенно различными массами. Более того, непонятно, почему наиболее крупные метеориты осуществили бомбардировку поверхности на заключительной стадии аккреции. И почему, наконец, этап «тяжелой бомбардировки» так сильно отстал от формирования небесных тел, более чем на 0,5 млрд. лет. Заманчиво предположить, что «тяжелая бомбардировка» связана с галактическими процессами более общего порядка, приведшими к резкому изменению орбит значительной части астероидов в Солнечной системе, или даже с прохождением Солнечной системы через район Галактики, насыщенный астероидами. Но все это не более чем гипотезы, тогда как решение этой важной планетологической проблемы — дело будущего.

Последующая эволюция небесных тел находилась в явной зависимости от их масс и запасов заключенной в них внутренней энергии. Поэтому на Земле продолжают интенсивные тектонические движения, сопровождаемые сейсмичностью, вулканическими процессами, значительными поднятиями и опусканиями участков коры, медленными перемещениями литосферных плит. На Марсе эти процессы закончились сравнительно недавно, тогда как активная тектоническая деятельность на Луне и Меркурии завершилась на рубеже порядка 3 млрд. лет. При этом проявлении тектонической активности на других небесных телах, по сравнению с Землей, гораздо менее значительны. Правда, и в этой закономерности оказались свои исключения. Несмотря на небольшие размеры, спутник Юпитера — Ио (который лишь немного больше Луны) обладает активной вулканической деятельностью. Однако этот факт получил свое объяснение, так как на Ио имеет место приливный разогрев недр.

Во всяком случае, историческая планетология, которая только начинает развиваться, будет способствовать выделению этапов преобразования поверхностей и недр небесных тел, выявлять общие закономерности в их эволюции, помогая тем самым расшифровать и объяснить последовательность событий в геологической истории Земли, особенно на ранних стадиях развития.



От изучения планет к познанию Земли

Достижения в исследовании далеких планет с помощью космической техники за последние десятилетия привели к выдающимся открытиям. И эти открытия интересны тем, что они позволяют применить их к изучению самой Земли. Хотя в познании Земли в последние десятилетия также достигнут большой прогресс, здесь еще осталось немало нерешенных проблем. И как это ни кажется парадоксальным, именно исследования далеких планет оказывают существенное влияние на развитие геологической науки. Постараемся рассказать о том, как некоторые сугубо геологические проблемы предстают в сравнительно-планетологическом аспекте.

Одна из таких проблем — становление первичной коры Земли. В земных условиях решать ее трудно, так как сложные геологические процессы на протяжении миллиардов лет исказили первозданный лик Земли, неузнаваемо изменили первичные горные породы. Во всяком случае, мы пока не знаем пород с возрастом, превосходящим 4 млрд. лет. А на Луне такие породы встречаются достаточно часто. Несомненно, они должны присутствовать на Марсе и Меркурии. Интерес к древнейшим породам земной коры имеет и практическое значение. Поиски рудных месторождений становятся все более глубинными. Успешно осуществляется бурение Кольской сверхглубокой скважины. Может быть, в недалеком будущем в глубинах так называемого «базальтового» геофизического слоя земной коры обнаружатся такие породы, которые окажутся реликтами первичной коры. И не исключено, что они будут схожи с основными магматическими породами, слагающими лунные континенты. С другой стороны, совершенствование методов опреде-

ления возраста горных пород показало, что известные древнейшие комплексы пород основного состава имеют еще больший возраст. Возможно, и это не является пределом. Во всяком случае, уже проводились работы, показавшие возможность принципиального сравнения древнейших комплексов земных пород основного состава и близких по составу пород лунных континентов.

На ранних этапах формирования континентальной коры Луны, Марса и Меркурия установлена большая роль метеоритной бомбардировки, завершившаяся так называемой «тяжелой бомбардировкой» телами астероидных размеров на рубеже 4 млрд. лет. По всем данным, аналогичные события в это же время должны были происходить и на Земле. К сожалению, аналоги круговых лунных морей в первозданном виде на Земле не сохранились. До последнего времени представления о подобной «лунной» или «марсианской» стадии в развитии Земли оставались сугубо гипотетическими. Положение несколько изменилось с внедрением в практику геологических работ материалов космических съемок, по которым и на Земле были выявлены гигантские кольцевые структуры, хотя и не очень отчетливые. Поперечники отдельных таких структур составляют многие сотни и даже тысячи километров. В виде округлых структур представлены из космоса крупный Анабарский массив и Прикаспийская впадина. Часто подобные структуры прослеживаются вне зависимости от тектонических элементов, охватывая, например, смежные части платформенных и складчатых областей. Высказывается предположение, что подобные структуры являются реликтовыми образованиями, непосредственно связанными с «тяжелой бомбардировкой». Последующая история Земли была более сложной по сравнению с другими планетами. Однако глубинный рисунок структуры, созданный в результате «тяжелой бомбардировки», мог в какой-то степени влиять на последующие геологические события. В этом мог проявляться принцип унаследованности в геологических преобразованиях. Глубинная неоднородность коры и верхов мантии предопределяла различия в проявлении процессов тепломассопереноса из недр Земли к ее поверхности. Не случайно, что некоторые крупные кольцевые структуры, выявленные на космическом изображении в ландшафте и растительности, не находят отражения в геологическом строении. По-видимому, они связаны с несколько повышенным тепловым потоком ввиду глубинной неоднородности коры. Это, в свою очередь, имеет важное практическое значение. Мы знаем, что часто рудные месторождения концентрируются

в виде рудных районов или узлов изометричной формы. Они никак не укладываются в те зоны, которые соответствуют тектоническим. Более определенно в ряде областей они увязываются с крупными кольцевыми структурами, дешифрируемыми на космических снимках. Такие работы выполнены для Алдано-Становой области, Средней Азии, Балтийского щита и др. Напрашивается вывод о том, что древнейший кольцевой рисунок в структуре земной коры и верхней мантии мог контролировать последующий подъем в приповерхностные части магматических расплавов и рудоносных растворов. В этом направлении еще многое предстоит сделать, но уже первые исследования представляются вполне обнадеживающими.

Интересная проблема возникла в связи с изучением планетарной делимости земной коры, системами трещин, закономерно ориентированных по отношению к оси вращения Земли. Решение этой проблемы в земных условиях сталкивается с большими трудностями из-за сложности структуры земной коры. К тому же если допустить значительные перемещения литосферных плит в горизонтальном направлении, первоначальный рисунок планетарных трещин окажется измененным. При изучении Луны и Марса вполне определенно усматривается преобладание трещин северо-западного и северо-восточного направлений в пределах континентальных областей. На океанических равнинах, покрытых базальтами, такого рисунка нет, да и самих трещин здесь гораздо меньше, а выражены они обычно менее отчетливо. Отсюда следует предположение, что закономерная делимость может возникать при становлении кор, особенно континентального типа, на ранних стадиях формирования поверхности планеты. Вероятно, подобный рисунок мог сохраниться и в земной коре в виде глобальной системы линеаментов, унаследованно проявляющих себя на протяжении геологической истории. Пути решения этой проблемы в земных условиях заключаются в выделении среди всей массы разрывных нарушений тектонических линий с древним заложением и унаследованным развитием, с закономерным структурным рисунком и с его возможными последующими искажениями при перемещениях крупных блоков коры, вплоть до литосферных плит.

По составу земная кора отличается от коры Луны и, вероятно, других планет, благодаря широкому распространению на континентах магматических и метаморфических пород кислого и среднего состава. Считается, что уже древнейшие горные породы, выявленные в земной коре, так называемые «серые гнейсы» с возрастом порядка 3,8 млрд. лет,

представляют собой измененные андезитовые лавы. Существовало мнение, что лунные континенты со светлой окраской также сложены кислыми магматическими породами, возникшими в процессе дифференциации магмы. Однако сейчас установлено, что кислые породы развиты только в земных условиях. Эти данные позволили объяснить образование кислых пород при участии дифференциации вещества в осадочных бассейнах с последующим их погружением в глубокие слои коры и переплавлением. Но ведь осадочные породы развиты и на Марсе. И не случайно грандиозные щитовые вулканы Марса так резко отличаются от проявлений вулканизма на Луне и Меркурии. Может быть, в их магматические очаги попала примесь осадочных пород, а сами лавы стали несколько более кислыми, например, андезито-базальтовыми.

Долгое время продолжалась дискуссия о времени образования земных океанических впадин. Были высказаны самые различные точки зрения. Сейчас установлено, что на Земле океанические впадины возникли сравнительно недавно, начиная с мезозоя. На других планетах их образование относят ко времени, следовавшему за «тяжелой бомбардировкой». В этом отношении Земля не должна быть исключением. Однако ввиду особой сложности развития нашей планеты этот процесс был, очевидно, многостадийным. Геологам еще предстоит реконструировать положение протоокеанов, а также океанических впадин последующих этапов океанообразования.

Определение направленности в тектонической эволюции Земли представляет большой интерес. Своего рода «футуро-геологические» исследования Земли служат для прогнозирования ее геологического будущего. Луна и Меркурий практически утратили свою тектоническую активность сразу же после завершения стадии формирования океанической коры, хотя на Марсе эти процессы сильно затянулись. По существующим представлениям в земных условиях сейчас активно продолжается многофазная стадия образования океанической коры с одновременным наращиванием континентов в переходных зонах. Ведь всю геологическую историю Земли можно представить как постоянное проявление процессов конструкции и деструкции континентальной и океанической коры. Вероятно, Земля обладает огромными запасами внутренней энергии, высвобождаемыми в процессе дифференциации вещества на разделах ядра и геосфер. Еще предстоит решать, ослабнут или усилятся эти процессы в будущем.

Исследования других планет привлекли внимание к проблеме метеоритных кратеров на Земле. Сначала открытия

древних метеоритных кратеров были встречены очень насто-
роженно, да и сейчас по поводу астроблемной природы ряда
структур ведутся споры. Однако по аналогии с другими плане-
тами возникновение астроблем в истории Земли, хотя и в
ограниченном количестве, должно было происходить по-
стоянно. Сейчас уже выполнены детальные исследования мно-
гих астроблем, подтвердивших их космогенное происхожде-
ние. С ними удалось увязать и тектиты — загадочные обломки
стекол со следами переноса в атмосфере, о происхождении
которых еще недавно высказывались самые различные гипоте-
зы.

И в заключение, пожалуй, стоит остановиться еще на одной
проблеме. Являясь планетой Солнечной системы и Галактики
в целом, Земля не может не испытывать на себе космических
влияний. Ее поверхности достигают метеориты и космическая
пыль. Она находится под воздействием различных полей и
излучений космического пространства. И не исключено, что
влияние космических факторов на эволюцию Земли значитель-
но выше, чем предполагается в настоящее время. Ведь до сих
пор надежно не объяснена причина периодичности в разви-
тии Земли, в проявлении процессов горообразования, в изме-
нениях климата. Есть интересные гипотезы, которые связывают
такую периодичность в тектонических движениях с положе-
нием всей Солнечной системы в различных частях Галактики,
а периодичность изменений климата объясняют изменениями
солнечной активности. Существенный вклад в изучение косми-
ческого влияния на геологические процессы должны внести
будущие сравнительно-планетологические исследования. Если
на других планетах обнаружатся признаки периодичности,
совпадающей с этапами развития Земли, то это будет важным
свидетельством в пользу общих причин, порождающих перио-
дичность в любом ее проявлении. Ведь когда-нибудь будут
определены и эпохи изменения климата на Марсе, в течение
которых происходило таяние мерзлоты и возникали бурные
потоки талых вод. Предположим, что они совпадут с эпохами
потепления климата на Земле — вот и новый ключ к решению
этой проблемы.

Рекомендуемая литература

Бронштэн В. А. Планета Марс. М., Наука, 1977. 95 с.

Влодавец В. И. Вулканы Земли. М., Недра, 1973.

Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М., 1978. 191 с.

Ксанфомалити Л. В. Планеты, открытые заново. М., Наука, 1978. 152 с.

Маров М. Я. Планеты земной группы. М., Наука, 1981. 266 с.

Мархинин Е. К. Вулканизм и жизнь. М., Мысль, 1980. 196 с.

Ходак Ю. А. География и геология планет (планетология). М., изд-во Моск. гос. пед. ин-та, 1972. 133 с.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ГЕОЛОГИЯ В ВЕК ИЗУЧЕНИЯ КОСМОСА	7
ФОТОПОРТРЕТЫ ПЛАНЕТ	12
ЧТО В ГЛУБИНАХ ПЛАНЕТ?	26
ПУСТЫННЫЕ КОНТИНЕНТЫ И БЕЗВОДНЫЕ ОКЕАНЫ	36
ВУЛКАНИЗМ ПЛАНЕТ	46
МЕТЕОРИТНАЯ БОМБАРДИРОВКА ПЛАНЕТ	56
ГИГАНТСКИЕ ТРЕЩИНЫ	67
ЧТО ТАКОЕ РЕГОЛИТ И КАК ОН ОБРАЗУЕТСЯ?	76
ЦАРСТВО ЭОЛА	82
ТЕКЛИ ЛИ РЕКИ НА МАРСЕ?	89
ТАЙНЫ МАРСИАНСКИХ КАНАЛОВ	96
ЗАМЕРЗШИЕ ПЛАНЕТЫ	100
ПОЛЯРНЫЕ ШАПКИ МАРСА: ЛЕД ИЛИ УГЛЕКИСЛОТА?	108
ЗАГАДКИ ВЕНЕРЫ	113
ПОЧЕМУ ПЛАНЕТЫ АСИММЕТРИЧНЫ?	123
ИСТОРИЧЕСКАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ	130
ОТ ИЗУЧЕНИЯ ПЛАНЕТ К ПОЗНАНИЮ ЗЕМЛИ	138
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	143

**Яков Гиршевич Кац, Владимир Викторович Козлов,
Наталья Валентиновна Макарова, Евгений Дмитриевич Сулиды-Кондратьев**

ГЕОЛОГИ ИЗУЧАЮТ ПЛАНЕТЫ

Редактор издательства **А. П. Хуповка**
Оформление художника **И. П. Лемешева**
Художественные редакторы **Е. Л. Юрковская, В. В. Евдокимов**
График-иллюстратор **Б. Д. Кондратьев**
Технический редактор **Н. В. Жидкова**
Корректор **К. С. Торопцева**
ИБ 5294

Сдано в набор 18.04.83. Подписано в печать 20.12.83. Т-22689. Формат 84 × 108¹/₃₂. Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Журнально-рубленая». Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,56. Усл. кр.-отт. 30,66. Уч.-изд. л. 8,22. Тираж 100 000 экз.
Заказ 2381/9101-1. Цена 55 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19. Ордена Трудового Красного Знамени
Калининский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. г. Калинин, пр. Ленина, 5.

55 к.

НЕАР

